N° d'enregistrement
Université de Bordeaux I
- 420 -

N° d'enregistrement
C.N.R.S.
- -

THÈSE

DE DOCTORAT D'ÉTAT ÈS SCIENCES NATURELLES

PRESENTÉE

A L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX I

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

James GERMANEAU

—«o»—

ETUDE DE LA SEDIMENTATION DANS LA SEINE

ET DANS SON ESTUAIRE.

—«o»—

Soutenue, le Janvier 1974, devant la Commission d'Examen :

MM. M. VIGNEAUX, Professeur	Président	
A. KLINGEBIEL, Professeur	Examinateurs	
J. ALVINERIE, Maître de Conférences	Examinateurs	
V. ROMANOVSKY, Ingénieur - Docteur	Invité	

- 1974 -

N° d'enregistrement
Université de Bordeaux I
- 420 -

N° d'enregistrement
C.N.R.S.
- -

THÈSE

DE DOCTORAT D'ÉTAT ÈS SCIENCES NATURELLES

PRESENTÉE

A L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX I

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

James GERMANEAU

-«o»-

ETUDE DE LA SEDIMENTATION DANS LA SEINE

ET DANS SON ESTUAIRE.

-«o»-

Soutenue, le Janvier 1974, devant la Commission d'Examen :

MM. M. VIGNEAUX, Professeur	.....	Président
A. KLINGEBIEL, Professeur	.....	Examinateurs
J. ALVINERIE, Maître de Conférences	.....	Examinateurs
V. ROMANOVSKY, Ingénieur - Docteur	.....	Invité

- 1974 -

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

AVANT - PROPOS

Avant d'exposer le résultat des recherches que j'ai entreprises, je voudrais faire part de ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont aidé dans la conduite de ce travail et dans la réalisation du volume que je présente aujourd'hui.

Je remercie Monsieur le Professeur M. VIGNEAUX d'avoir accepté la présidence du Jury,

Je remercie M. le Professeur A. KLINGEBIEL d'avoir attentivement revu le texte que je lui ai présenté.

Je remercie Monsieur J. ALVINERIE, Maitre de Conférences, de m'avoir fait part de ses observations et d'avoir accepté de siéger parmi les membres du Jury.

Je remercie Monsieur V. ROMANOVSKY, Directeur du C.R.E.O. de m'avoir, il y a déjà longtemps, recueilli dans son Laboratoire de La Rochelle et d'avoir accepté que, dans des circonstances difficiles, je me consacre à des recherches personnelles.

Je remercie de leur application et de leur dévouement le personnel de la Station Océanographique de La Rochelle :

Madame M. PRIGENT, Secrétaire, a dactylographié le texte avec beaucoup de soin,

Monsieur J. BOUQUET, Chimiste,

Monsieur G. LEBOULER, Dessinateur,

Monsieur J. PREVOST, Dessinateur,

ont composé tous les dessins et n'ont pas hésité à m'accompagner dans des tâches beaucoup plus humbles.

Je remercie Monsieur P. LEGIGAN et Monsieur P. REJASSE d'avoir tout fait pour réaliser en peu de temps un travail d'édition dont la qualité n'a pas été compromise par la hâte.

TABLE DES MATIERES

	Page
I - INTRODUCTION	1
II - BUT DES RECHERCHES ET METHODES D'ETUDE	2
III - ETUDE DES SABLES DE L'AUBE, DE L'YONNE, DE L'ARMANCON ET DU LOING	4
III-1 - Histoire du bassin de la Seine pendant le Tertiaire	4
III-2 - Etude des sables de l'Aube	7
III-2-1 - Quartz et calcaires	7
III-2-2 - Minéraux lourds	8
III-2-3 - Origine des sables de l'Aube	8
III-3 - Etude des sables de l'Armançon	9
III-3-1 - Quartz et feldspaths	9
III-3-2 - Minéraux lourds	10
III-3-3 - Influence du Morvan	10
III-4 - Etude des sables de l'Yonne	10
III-4-1 - Calcaire, quartz, feldspaths	10
III-4-2 - Minéraux lourds	11
III-4-3 - L'Yonne et le Morvan	11
III-5 - Etude des sables de la Petite Seine	12
III-5-1 - Originalité de la Petite Seine	12
III-5-2 - Calcaires, silex, quartz	12
III-5-3 - Minéraux lourds	13
III-5-4 - Importance de la Petite Seine	13

TABLE DES MATIERES

Pages

I - INTRODUCTION 1

II - BUT DES RECHERCHES ET METHODES D'ETUDE 2

III - ETUDE DES SABLES DE L'ADAE, DE L'IONNE, DE L'ARMANCON ET DU LOING 4

III-1 - Histoire du bassin de la Seine pendant le Tertiaire 4

III-2 - Etude des sables de l'Auxois 7

III-2-1 - Quartz et calcaires 7

III-2-2 - Minéraux lourds 8

III-2-3 - Ortigine des sables de l'Auxois 8

III-3 - Etude des sables de l'Armançon 9

III-3-1 - Quartz et feldspaths 9

III-3-2 - Minéraux lourds 10

III-3-3 - Influence du Morvan 10

III-4 - Etude des sables de l'Yonne 10

III-4-1 - Calcaire, quartz, feldspaths 10

III-4-2 - Minéraux lourds 11

III-4-3 - L'Yonne et le Morvan 11

III-5 - Etude des sables de la Petite Seine 12

III-5-1 - Ortginalité de la Petite Seine 12

III-5-2 - Calcaires, silex, quartz 12

III-5-3 - Minéraux lourds 13

III-5-4 - Importance de la Petite Seine 13

Page

III-6 - Etude des sables du Loing 14

III-6-1 - Quartz et feldspaths 15
III-6-2 - Origine lointaine et mode de transport des sables du Loing 15
III-6-3 - Minéraux lourds 16
III-6-4 - Le problème des augites denticulées 17

IV - ETUDE DES SABLES DE LA MARNE ET DE L'OISE 19

IV-1 - Sables de la Marne 19

IV-1-1 - Quartz, calcaires, silex 19
IV-1-2 - Minéraux lourds 20

IV-2 - Sables de l'Oise 20

IV-2-1 - Quartz, calcaires, silex 20
IV-2-2 - Minéraux lourds 20

IV-3 - Apports de l'Oise et de la Marne 21

V - ETUDE DES SABLES DE LA SEINE FLUVIALE 21

V-1 - Sables en amont de Paris 22

V-1-1 - Quartz, feldspaths, calcaires et oolithes ferrugineux 22
V-1-2 - Minéraux lourds 22

V-2 - Sables en aval de Paris 23

V-2-1 - Composition des alluvions du chenal de Navigation 23
V-2-2 - Etude qualitative des particules sableuses 24
V-2-3 - Répartition dimensionnelle des éléments 25
V-2-4 - Granulométrie et génèse des sables de la Seine 26

Page

V-2-5 - Origine des associations de minéraux lourds 26

V-2-5-1 - Sables provenant du Tertiaire 27
V-2-5-2 - Sables provenant du Crétacé et du Tertiaire 27
V-2-5-3 - Sables provenant du Crétacé, du Tertiaire, du Morvan et du Massif Central 27

V-2-6 - Régimes de la Seine et répartition des sables fluviatiles 28

VI - ETUDE DES SABLES DE LA SEINE FLUVIO-MARINE 29

VI-1 - Définition des sables fluvio-marins 30
VI-2 - Nature et origine des sables fluvio-marins 30
VI-3 - Evolution des apports marins entre Vieux-Port et Biessard 31

VII - ETUDE DES SABLES DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE 32

VII-1 - Déplacement vers l'amont des sables marins entre Le Havre et la Risle 33

VII-1-1 - Répartition horizontale du quartz 33
VII-1-2 - Minéraux lourds caractéristiques 34

VII-2 - Pénétration des sables du large dans l'estuaire 34
VII-3 - Nature et déplacement des sables entre Trouville et Honfleur 35
VII-4 - Origine des sables de l'estuaire de la Seine 36

Page

VIII - ETUDE DES SABLES DE LA REGION HAVRAISE 37

VIII-1 - Origine de la topographie sous-marine de la région havraise 37

VIII-2 - Dérive littorale récente de la Grande Rade 38

VIII-3 - Rabattement des sables du large par les houles actuelles 38

VIII-4 - Dérive littorale actuelle de la plage Sainte-Adresse 39

VIII-5 - Apports du large et apports de la Seine dans la fosse de la Carosse 39

VIII-6 - Déplacement des suspensions fluviales et envasement du port du Havre 39

IX - ETUDE HYDROLOGIQUE DE LA SEINE 40

IX-1 - La marée dans la Manche 40

IX-2 - La marée au Havre 40

IX-3 - Propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine 41

IX-4 - Le mascaret et la mise en suspension 42

IX-5 - Circulation des eaux dans l'estuaire 43

IX-6 - Dissymétrie des courants de marée à l'entrée de l'estuaire 44

X - ELABORATION DES SUSPENSIONS DANS LA SEINE ET DANS SON ESTUAIRE 44

X-1 - Suspensions de la Seine fluviale 44

X-1-1 - Turbidité à Chatou 45

X-1-2 - Nature des suspensions de Poses 45

X-1-3 - Suspensions à Rouen 46

X-1-3-1 - Turbidité et courants 46

X-1-3-2 - Nature des suspensions à Rouen 47

Page

X-2 - Suspensions de la Seine fluvio-marine 47

X-2-1 - Suspensions de Caudebec 47

X-2-1-1 - Turbidité, coefficient de marée et débit fluvial 48

X-2-1-2 - Influence du mascaret sur la mise en suspension 48

X-2-2 - Mécanisme de déplacement des particules dans la Seine fluvio-marine 50

X-3 - Suspensions de l'estuaire de la Seine 51

X-3-1 - Suspensions à Quilleboeuf 51

X-3-2 - Suspensions à Tancarville 51

X-3-3 - Suspensions dans le chenal de Navigation 52

X-3-3-1 - Turbidité, vitesse, hauteur d'eau 52

X-3-3-2 - Déplacement des suspensions en vive-eau 54

X-3-3-3 - Déplacement des suspensions en morte-eau 54

X-3-4 - Suspensions dans le chenal Nord 55

X-4 - Suspensions en mer 55

X-4-1 - Courants et chlorinités 56

X-4-2 - Débit solide d'étiage 56

X-4-3 - Débit solide en période moyenne 58

X-4-4 - Débit solide de crue 59

XI - SEDIMENTATION DANS LA REGION HAVRAISE 60

XI-1 - Sedimentation dans le chenal d'Accès 60

XI-1-1 - Chenal externe 61

XI-1-2 - Chenal moyen 62

Page

XI-1-3 - Chenal interne 63

XI-2 - Sédimentation dans l'avant-port 65

XI-3 - Sédimentation dans le port 65

XII - SEDIMENTATION DANS LA SEINE ET DANS SON ESTUAIRE - ORIGINE ET DEPLACEMENT DES SABLES ET DES VASES 66

XII-1 - Nature et origine des sables de la Seine fluviale 66

XII-1-1 - En amont du Loing 66

XII-1-2 - Les apports du Loing 67

XII-1-3 - Sables de la Seine entre le Loing et Paris 68

XII-1-4 - Apports de la Marne et de l'Oise 68

XII-1-5 - Sables en aval du confluent de l'Oise 69

XII-1-6 - Apports actuels de la Seine fluviale 70

XII-1-7 - Influence de la marée mécanique entre Poses et Rouen 70

XII-2 - Nature et origine des sables de la Seine fluvio-marine 71

XII-3 - Nature et origine des sables de l'estuaire de la Seine 72

XII-4 - Nature et origine des sables en mer 74

I - INTRODUCTION

La Seine est un fleuve à méandres dont la pente varie de 0,1 à 0,2 °/$_{oo}$ et dont le débit moyen est faible (450 m^3/s.). Son cours supérieur est aménagé jusqu'à Poses qui se trouve à 160 km du port du Havre. On observe que pour une petite crue, les barrages étant ouverts, la vitesse en surface est de l'ordre de 100 cm/s. La lenteur de l'écoulement et la présence de nombreux méandres qui ont été ébauchés au Pliocène permettent de comprendre que le transport de la Seine est actuellement très faible. Il y a une grande différence entre les alluvions grossières qu'on trouve dans l'axe du chenal de navigation et les suspensions très fines qui franchissent l'estuaire.

Les sables fluviatiles grossiers ont des caractères qui sont très variables d'un point à l'autre. Cela signifie que les méandres recoupent actuellement les chenaux d'une rivière beaucoup plus active qui divaguait d'un bord à l'autre d'une vallée beaucoup plus large.

La Seine fluviale, que n'atteint aujourd'hui aucune influence marine, a un bassin versant de 74.250 km^2. Les affluents, qui sont nombreux, traversent toutes les auréoles sédimentaires du Bassin Parisien, depuis le Jurassique inférieur jusqu'à la fin du Tertiaire.

Jusqu'à une époque récente, ils ont tous joué leur rôle et les sables ont un caractère composite jusqu'à Vieux-Port qui se trouve à 32 km de la mer.

L'estuaire a toujours été mieux connu que la rivière. Avant 1848 il était sauvage et encombré de lits sableux mobiles jusqu'à La Mailleraye, c'est-à-dire sur une distance de 50 km.

A partir de 1848 le calibrage de l'embouchure a progressivement déplacé l'estuaire vers l'Ouest. La limite des bancs sableux mobiles se situe actuellement au confluent de la Risle, c'est-à-dire à 16 km du port du Havre.

La sédimentation dans l'estuaire de la Seine a été étudiée par de nombreux auteurs d'une manière qui nous paraît insuffisante.

Le travail que nous présentons contient quatre éléments essentiels qui nous paraissent nouveaux :

- Nous avons dessiné le trajet précis que suivent les sables jusqu'à la Risle, et déterminé la limite vers l'amont des apports marins actuels.

- Nous avons décrit la fraction sableuse des alluvions de la Seine jusqu'à Paris, et déterminé la part qui revient à chaque affluent.

- Nous avons pour la première fois montré que, par la voie du Loing et de l'Allier, des sables volcaniques se sont déposés dans le bassin de Paris.

- Nous avons défini, du point de vue minéralogique et granulométrique, le caractère des suspensions typiquement fluviales.

II - BUT DES RECHERCHES ET METHODES D'ETUDE

Notre travail a débuté en 1962 à la suite d'une décision de M. LAVAL, Directeur des Ports Maritimes et des Voies Navigables. Son but était à l'origine de résoudre le problème de l'envasement du port du Havre.

Très vite il est apparu qu'il était nécessaire de joindre à celle de l'estuaire, une étude de la Seine fluviale jusqu'à Paris. De nombreux points restaient encore obscurs, et nous avons étudié les sables des affluents.

Les caractères très inattendus des alluvions du Loing nous ont contraint d'introduire dans notre étude, des observations qui ont été faites dans les Limagnes de Loire et d'Allier.

L'étude comparée des alluvions marines et continentales a été faite en grande partie sur la fraction inférieure à 2 mm. Les graviers et les galets ont été étudiés par d'autres auteurs, et nous avons utilisé leurs résultats.

Notre analyse est exclusivement qualitative. Nous n'avons pas abordé le problème des cubages et des vitesses de sédimentation.

Notre seul objectif a toujours été de déterminer l'origine et le sens de déplacement des sables par l'étude des minéraux lourds.

L'analyse granulométrique nous a permis de définir les modes de transport et de comparer les sables fluviatiles aux sables marins.

L'étude des argiles est sommaire. Elle semble cependant suffire, car nous pouvons maintenant affirmer que si les sables actuels de l'estuaire ont une origine marine, les argiles qui se déposent dans le port du Havre ont une origine fluviale.

III - ETUDE DES SABLES DE L'AUBE, DE L'YONNE, DE L'ARMANCON ET DU LOING

Le problème de l'origine des alluvions de la Seine en aval de Paris doit être examiné à l'échelle du Bassin Parisien tout entier. Nous nous inspirons beaucoup du travail de POMEROL (1967 - p. 55-86) qui présente d'une manière claire et concise l'évolution de la tectonique et des apports sédimentaires depuis le début du Tertiaire.

Les alluvions de l'Aube, de l'Yonne, de l'Armançon, du Loing, de la Marne et de l'Oise ont des caractères morphoscopiques et minéralogiques si variés, et offrent l'image d'une mosaïque si complexe que le problème de leur origine est assez difficile à établir.

Il faut remonter presque jusqu'aux sources de ses affluents pour dessiner les grandes lignes de l'évolution de la Seine au Quaternaire récent.

III-1 - Histoire du bassin de la Seine pendant le Tertiaire

L'histoire de la Seine ou du réseau qui l'a précédé semble commencer au début du Tertiaire. A ce moment là, on passe sans peine du Massif Central au Bassin Parisien, selon une pente continue qui n'entrave pas l'épandage des sédiments qui viennent du Sud ou du Sud-Est.

Au Sparnacien et au Cuisien, on observe des apports fluviatiles détritiques qui sont grossiers et qui occupent la limite entre la Loire et la Seine. Ces dépôts peuvent contenir des feldspaths, mais sont dépourvus d'augite ou d'olivine. Ils semblent provenir de massifs granitiques du Limousin, et sont antérieurs au volcanisme d'Auvergne.

Pendant les périodes transgressives du Tertiaire

(Thanetien, Lutetien, Bartonien) et sans doute par dérive littorale, des sédiments d'origine nordique atteignent la région parisienne, où ils se sont vraisemblablement mêlés à des apports d'origine armoricaine (POMEROL Ch. - 1964 - p. 153).

Cette forme d'alimentation par transfert longitudinal et rabattement à la côte lors de l'élévation du niveau de l'eau est très vraisemblable et se retrouve actuellement aussi bien dans les petites baies que dans les golfes.

Cette dérive nordique apporte avec elle trois minéraux (épidote, hornblende, grenat) qui sont très précieux. On les trouve actuellement aussi bien sur les côtes du Calvados, que sur celles du Pays de Caux, de Picardie ou de Flandre.

Des déformations du Bassin Parisien se font sentir dès l'Oligocène et semblent croître pendant le Miocène.

Les derniers grands épandages qui viennent du Massif Central dateraient du Burdigalien et empruntent un trajet qui correspond à peu près à celui des vallées de la Seine et du Loing.

Des études récentes ont montré que le socle du Bassin est caractérisé par des axes magnétiques et gravimétriques qui sont vraisemblablement d'origine primaire. Une ligne de rupture passant entre Gien et Orléans divise le Bassin Parisien en deux blocs continentaux qui n'ont pas le même équilibre isostasique.

Les mouvements tertiaires ont sans doute fait rejouer cette structure et favorisé ainsi le passage des "sables granitiques" qui seraient contemporains du volcanisme d'Auvergne. Ces sables sont dépourvus d'augites. Ce détail qui a plus d'importance qu'on ne croît, laisse les auteurs un peu perplexes (POMEROL Ch.-1951).

A cette époque la vallée de la Seine n'est pas encore creusée et les "courants" auraient emprunté une large dépression peu profonde.

La communication entre la bassin de la Loire et celui de la Seine paraît si importante, que certains auteurs ont pu dessiner un réseau fluvial relativement simple, dont un bras conduit à la Creuse et l'autre à l'Allier.

Au Vindobonien se dessine une ligne de partage des eaux qui isole la Loire de la Seine. La Loire change son cours et va désormais se jeter dans l'Atlantique.

La Seine est maintenant privée des apports du Massif Central.

Pendant le Quaternaire la vallée de la Seine se dessine, les formations du Tertiaire sont érodées et un relèvement général de la partie occidentale du Bassin Parisien donne naissance aux rivages de la Manche orientale.

Le Bassin de la Seine peut donc être divisé en trois cantons qui seraient les suivants :

- l'Aube, la Petite Seine, l'Armançon et l'Yonne sont à mettre en relation avec le Morvan et les auréoles sédimentaires de l'Est du Bassin de Paris,

- le Loing peut contenir des éléments provenant de la Loire et de l'Allier,

- la Marne et l'Oise peuvent avoir repris des dépôts du Tertiaire contenant des minéraux d'origine nordique.

III-2 - Etude des sables de l'Aube

III-2-1 - Quartz et calcaires

Tant que l'Aube n'a pas franchi les auréoles sédimentaires du Crétacé ou les formations continentales qui les surmontent, les éléments siliceux sont très rares. Ils font presque totalement défaut au-dessus de 200 microns. Les alluvions sont grossières et se présentent sous la forme d'une grave calcaire contenant des grains usés qui sont bruns ou blancs (échantillon n° 92 - fig. 1).

Les oolithes sont de petite taille (20 à 40 microns) et proviennent vraisemblablement du Jurassique moyen (Bathonien, Callovien).

Les calcaires lithographiques qui se présentent sous forme de tablettes dont les arêtes sont très émoussées proviendraient du Lusitanien (NOUGIER - 1960 - p. 39).

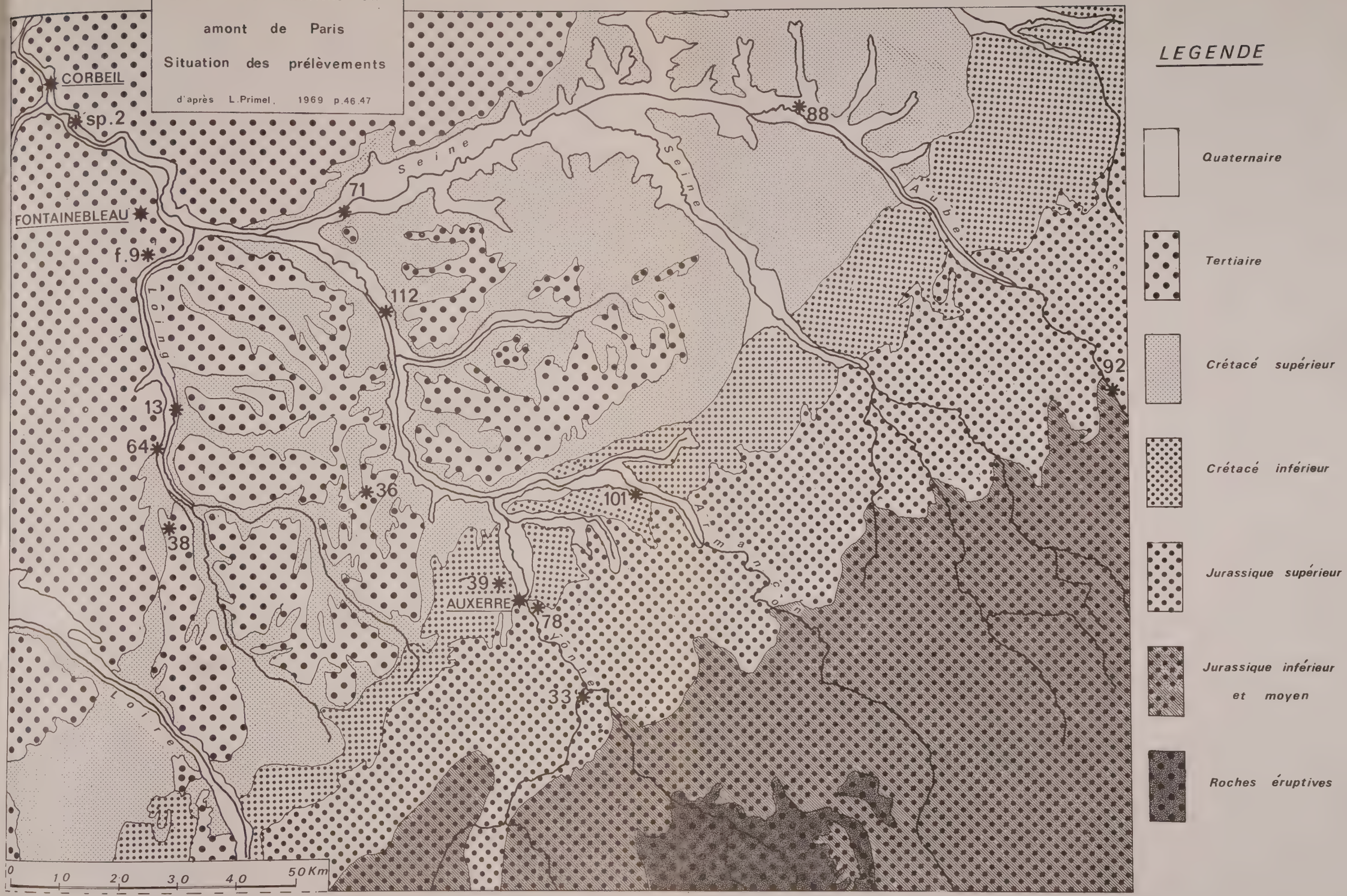
D'après TRICART (1951 - p. 498) cette grave serait formée de particules empruntées aux calcaires qui sont moyennement gelifs. Elles constituent sur les pentes des accumulations solifluées avant d'être incorporées aux transports longitudinaux.

La phase quartzeuse du sédiment est exclusivement formée de grains non usés ou émoussés luisants.

Le passage du Crétacé se traduit par une augmentation brutale des quartz (échantillon n° 88 - fig. 1).

Les silex blancs forment 23 % de la fraction supérieure à 2 mm et de nombreux grains sont d'origine locale.

Fig . 1 .


Etude des alluvions en amont de Paris
Situation des prélèvements
d'après L.Primel, 1969 p.46.47
CORBEIL
sp.2
FONTAINEBLEAU
f.9
71
88
112
92
13
64
36
101
38
39
AUXERRE
78
33
Seine
Seine
Aube
Loing
Armançon
Yonne
Loire
0 10 20 30 40 50 Km
LEGENDE
Quaternaire
Tertiaire
Crétacé supérieur
Crétacé inférieur
Jurassique supérieur
Jurassique inférieur et moyen
Roches éruptives

Ceux qui sont lisses et usés proviennent des formations marines du Crétacé supérieur, ceux qui sont ronds et mats proviennent des dépôts continentaux du Crétacé inférieur (NOUGIER - 1960 - op. cit. p. 51-52).

III-2-2 - Minéraux lourds

Le cortège minéralogique est caractérisé par des tourmalines vertes et brunes de grande taille.

Dans la fraction fine (50-100 microns) on trouve dans un ordre décroissant : le zircon, la tourmaline, la staurotide, le rutile et accessoirement le disthène, le grenat, la hornblende verte et l'andalousite.

III-2-3 - Origine des sables de l'Aube

Bien que le nombre des échantillons que nous avons analysés soit réduit, nous proposons les idées suivantes :

- les alluvions de l'Aube s'enrichissent en quartz de l'amont vers l'aval. Les calcaires du Jurassique sont très repidement polis. Les calcaires crayeux du Crétacé supérieur sont abondants au passage des couches. Nous verrons qu'ils disparaissent très vite en aval,

- le Crétacé supérieur fournit très peu de grains de quartz non usés et de grande taille,

- les formations continentales du Crétacé inférieur libèrent une quantité assez importante (15 %) de grains de quartz mats et grossiers,

- les minéraux lourds et transparents apparaissent brutalement au Crétacé et se mêlent aux minéraux opaques du

Jurassique. Ils forment un fond qui sera commun à tous les affluents que nous allons considérer.

Les grains sont usés. La tourmaline et le rutile présentent de nombreuses variétés. On voit apparaître d'une manière très discrète des minéraux qui se multiplieront au Tertiaire et que l'on considère comme caractéristiques d'une province marine :

- épidotes vertes et jaunes,
- grenats hyalins,
- hornblendes vertes.

III-3 - Etude des sables de l'Armançon

Les alluvions de l'Armançon diffèrent de celles de l'Aube par la présence de particules d'origine "granitique". Par contre, la phase calcaire formée de calcaires oolithiques, biodétritiques ou lithographiques est très voisine de la précédente.

III-3-1 - Quartz et feldspaths

Les grains de quartz qui sont isolés sont hyalins, laiteux, gris ou jaunes et ont une forme très irrégulière. Ils sont souvent mamelonnés ou caverneux et les arêtes sont toujours vives. On trouve également des quartz idiomorphes et des quartz filoniens en éléments "emboités" semblables à ceux qui ont été décrits par POMEROL dans les sables de Lozère (1951 - p. 255).

Les feldspaths sont mal dissociés de la muscovite et du quartz. Au-dessus de 2 mm ils forment des grains composites qui sont irréguliers et anguleux. Ces feldspaths qui ne sont pas altérés sont roses ou blancs et portent en surface des lamelles de biotite parfois altérée et verte.

III-3-2 - Minéraux lourds

La proximité du massif du Morvan modifie beaucoup le cortège minéralogique. On voit apparaître des grenats roses et anguleux, des hornblendes vertes ou brunes, des staurotides de grande taille et des tourmalines brunes qui ne sont pas usées. Le zircon est très souvent zoné.

III-3-3 - Influence du Morvan

Les alluvions de l'Armançon sont donc caractérisées par le présence de particules provenant de la désagrégation des roches cristallines ou cristallophyliennes du massif du Morvan.

L'influence du Morvan se traduit par une élévation très rapide du nombre des quartz non usés dont la taille est supérieure à 2 mm (56,3 % au lieu de 2,8 %).

Par contre, l'influence du Crétacé est beaucoup moins prononcée.

III-4 - Etude des sables de l'Yonne

A quelque niveau que ce soit, les alluvions de l'Yonne sont plus riches en éléments d'origine "granitique" que celle de l'Armançon.

III-4-1 - Calcaires, quartz, feldspaths

La phase calcaire est plus grossière que la phase insoluble. Elle est formée de calcaires oolithiques, biodétritiques ou lithographiques qui proviennent en grande partie des faciès récifaux du Jurassique moyen et qui ressemblent beaucoup à ceux qu'on trouve dans l'Aube ou dans l'Armançon.

La phase insoluble, qui est d'origine morvandelle est très grossière et les particules supérieures à 2 mm sont souvent des granites à amphiboles ou des feldspaths à nombreuses inclusions de quartz et de biotite.

L'importance du matériel d'origine cristalline décroît de l'amont vers l'aval (échantillons n° 33 et 78 - fig. 1).

En aval du confluent de l'Yonne et de l'Armançon, les apports du Jurassique et du Crétacé tempèrent ceux du Morvan (échantillon n° 112 - fig. 1).

L'étude détaillée du matériel provenant du Morvan figure dans une publication antérieure (GERMANEAU J. - 1971 - p. 66-67).

III-4-2 - Minéraux lourds

Nous pouvons retenir que les minéraux caractéristiques sont les suivants :

- grenats roses ou hyalins, anguleux et grossiers,
- hornblendes vertes altérées,
- tourmalines brunes et staurotides non usées,
- zircons zonés ou non mais toujours frais.

III-4-3 - L'Yonne et le Morvan

L'Yonne semble constituer la voie par laquelle sont évacués la plupart des éléments d'origine métamorphique ou éruptive. La Cure semble avoir été une grande pourvoyeuse, car elle traverse des granites sur 40 km. Les granites, les granulites et les rhyolites forment d'après TRICART, 45 % de ses alluvions (1951 - p. 504). Après son confluent avec

l'Yonne, on estime à 10 ou 15 % l'importance des apports longitudinaux provenant de la partie cristalline du massif du Morvan.

III-5 - Etude des sables de la Petite Seine

III-5-1 - Originalité de la Petite Seine

En amont de son confluent avec l'Yonne la Petite Seine présente des caractères bien particuliers :

- la phase quartzeuse est fine et bien classée,

- les minéraux lourds forment un cortège plus riche que dans l'Aube,

- de nombreux quartz sont émoussés luisants ou ronds luisants.

On peut considérer que certaines formations sableuses du Tertiaire ont été remaniées par de petits affluents de la rive droite (la Voulzie et la Nauxe).

Les sables du point n° 71 contiennent pour la première fois des éléments provenant du Tertiaire (Sparnacien, Stampien).

III-5-2 - Calcaires, silex, quartz

Les sédiments du point n° 71 (fig. 1) sont caractérisés par une fraction grossière qui est calcaire et très voisine de celle de l'Aube. L'influence du Crétacé supérieur se traduit par une grande abondance de silex jaunes ou blancs.

Au-dessous de 2 mm les grains de quartz sont toujours émoussés ou bien ronds et luisants. Ils proviennent

vraisemblablement des formations tertiaires qui dominent la rive droite du fleuve (PRIMEL - 1969 - p. 32).

Si on fait abstraction des gravelles calcaires, le sédiment est très fin et bien classé. On voit également apparaître des quartz roses qui sont transparents, toujours usés et que nous retrouverons dans la Seine fluviale en aval de Paris. Jusqu'à plus ample information nous considérons qu'ils proviennent de dépôts marins de l'Eocène ou de l'Oligocène.

III-5-3 - Minéraux lourds

Les minéraux lourds sont en général usés. Le fond que nous avons trouvé dans l'Aube subsiste (staurotide, tourmaline, zircon). On voit apparaître des minéraux nouveaux qui proviennent peut être du Stampien (hornblende verte, grenat).

III-5-4 - Importance de la Petite Seine

STEPHAN (1960 - p. 78) considère que la Petite Seine a joué un petit rôle dans l'alluvionnement. Elle a seulement apporté des sables fins et usés qui proviennent des sables du Sparnacien et des sables de Fontainebleau.

En aval du confluent de l'Yonne, on observe cependant que ces apports ne sont pas négligeables.

Les quartz de grande taille sont anguleux et les quartz de petite taille sont usés et forment 75 % de l'ensemble (ROUMILHAC - 1960 - p. 12).

Nous voyons donc que dans un système fluvial, il est très difficile d'évaluer, du point de vue pondéral, les

apports respectifs de chaque rivière. L'importance de l'une ou de l'autre varie avec la classe granulométrique que l'on considère. Il peut en effet arriver "que l'apport d'une des "deux rivières soit prédominant aux grandes dimensions et "l'apport de l'autre aux petites".

Ce principe qui a été formulé par ROUMILHAC (op. cit. p. 12) est très précieux et nous l'avons largement utilisé pour analyser la génèse des alluvions de la Seine fluviale.

En mélangeant par exemple les sables de l'Yonne avec ceux de la Petite Seine, on obtient des alluvions mixtes dont, à première vue, le caractère le plus surprenant est d'avoir une fraction grossière moins usée que la fraction fine.

Nous verrons un peu plus loin qu'on observe le même phénomène chaque fois que des éléments "granitiques" d'origine ligérienne ou morvandelle se mêlent aux sables marins du Tertiaire qui sont plus fins.

En conclusion, nous pouvons admettre qu'après le confluent de l'Yonne, les caractères morphoscopiques des alluvions de la Seine sont fixés dans leurs grandes lignes.

III-6 - Etude des sables du Loing

Les alluvions les plus récentes du Loing contiennent des augites vertes denticulées qui sont très abondantes dans la vallée de l'Allier.

Ces augites semblent provenir du remaniement par le Loing et ses affluents d'une nappe qui se trouve actuellement entre 110 et 150 m. d'altitude (fig. 2).

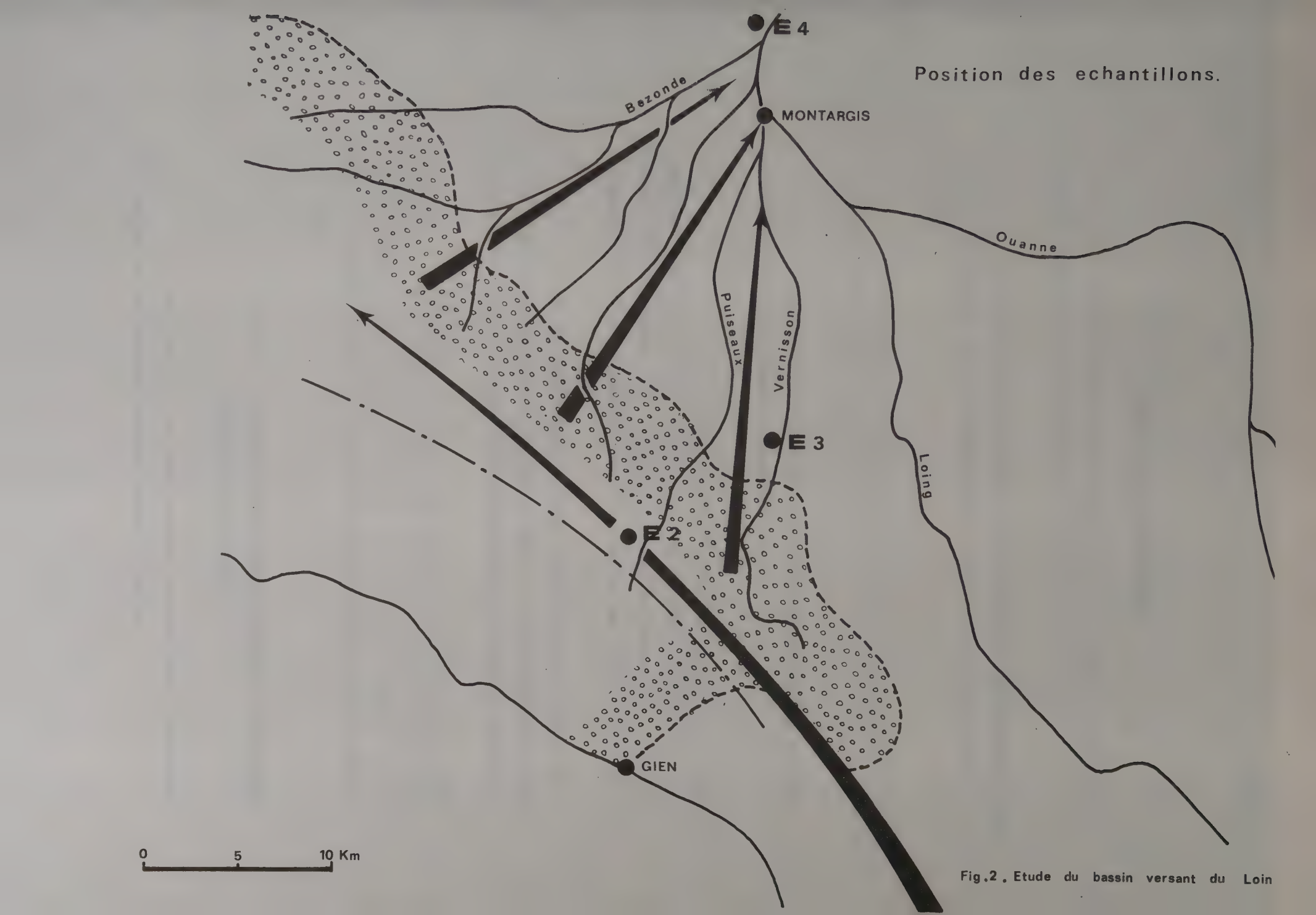


Fig.2. Etude du bassin versant du Loin

III-6-1 - Quartz et feldspaths

Les alluvions du loing sont très grossières, blanches et tout à fait dépourvues d'éléments calcaires.

Les grains de quartz (irréguliers, idiomorphes, mâclés, filoniens) sont comparables à ceux qu'on trouve dans l'Yonne.

L'origine cristalline d'une partie de ce matériel ne saurait être mise en doute.

Par comparaison avec les sables du Morvan on peut établir les différences suivantes :

1) l'altération chimique des feldspaths est beaucoup plus prononcée que dans l'Yonne, où les actions mécaniques semblent avoir été dominantes. Les cristaux sont finement craquelés et les clivages sont soulignés par des oxydes de fer,

2) la désagrégation est plus complète. Nous ne trouvons pas de fragments de granites ni d'inclusions de biotite ou de muscovite dans les cavités des grains de quartz,

3) l'état d'usure des grains de quartz ne paraît pas être à la mesure du transport qu'ils ont subi, si on admet qu'ils viennent de la Limagne. Comme dans l'Yonne, les émoussés-luisants et les non-usés sont répartis à peu près à égalité.

III-6-2 - Origine lointaine et mode de transport des sables du Loing

Les quartz que nous avons trouvés dans le bassin du Loing ne présentent aucune trace d'usure.

Cette observation est à rapprocher de celle qui a été faite par POMEROL à propos des sables de Lozère qui ont sans doute à peu près la même origine, mais qui sont vraisemblablement antérieurs.

Faisant allusion aux travaux de LUTAUD et de DENIZOT, cet auteur pense que la présence de quartz non usés peut être expliquée en faisant appel à un écoulement boueux ou à une décomposition sur place de galets granitiques (POMEROL - 1967 - p. 76). Les écoulements en nappe ont été décrits par CAILLEUX (1950 - p. 260) et leurs effets sont actuellement assez bien connus (FISHER R.V. - 1971 - p. 916 à 927). Nous savons que le mouvement de l'ensemble du courant est laminaire, que la phase dispersante doit être très riche en sablons, en silts, en argiles, qu'il n'y a pas de classement horizontal lors du dépôt, et que toute la masse s'immobilise dès que les forces deviennent inférieures aux forces de cohésion.

Dans cette forme de transport il n'y a ni usure, ni classement, ni érosion du substrat.

III-6-3 - Minéraux lourds

Le cortège des sables du Loing (échantillons E 2 - E 3 - E 4 - fig. 2) est caractérisé par les minéraux suivants :

- l'augite est grossière et de couleur verte plus ou moins foncée. On note parfois une nuance grise ou brune. La plupart des grains sont striés, frais, et leur terminaison peut être denticulée,

- la hornblende brune, parfois rouge, massive est parfaitement conservée,

- le grenat est grossier non usé, de forme très irrégulière et contient parfois des inclusions noires,

- les minéraux lourds très usés (disthène, tourmaline, staurotide, zircon) pourraient provenir des remaniements des dépôts du Secondaire ou du Tertiaire de la bordure méridionale du Bassin de Paris.

III-6-4 - Le problème des augites denticulées

L'augite verte se présente sous des formes comparables à celles qui ont été décrites dans les alluvions ponceuses de l'Allier (PELLETIER H. - 1969 - p. 182 à 186).

On doit donc séparer ces dépôts à augites aciculaires, fasciculées ou denticulées de la région de Gien ou de Montargis, des sables "granitiques" de la pré-Seine qui ne contiennent pas de pyroxènes monocliniques (DUPLAIX et POMEROL-1948 - p. 37-39).

Nous pensons que cet épandage date vraisemblablement du Villafranchien, car les augites à figures de corrosion sont inconnues avant cette époque (RUDEL A. - 1963 -).

Les grains de basalte qui sont si abondants dans les alluvions récentes de la Loire (LOUAIL J. - 1969 -) font tout à fait défaut dans les échantillons que nous avons examinés.

Nous avons également remarqué que les augites de Montargis sont différentes et plus fraîches que celles de la Loire actuelle (La Charité). La nature du matériel utilisé a donc varié au cours du Quaternaire.

Nous avons imaginé que les laves ponceuses qui

sont si fragiles ont été disponibles les premières et qu'elles ont été évacuées avant que les coulées compactes aient été disloquées (GERMANEAU J. - 1971 - p. 270).

Les basaltes ont pu être fragmentés ultérieurement, lors d'un refroidissement général du climat au Quaternaire (RUDEL A. - 1954 -).

A une époque très récente les alluvions "villafranchiennes" semblent avoir été reprises par des rivières dont le trajet est très précis.

Le Loing et ses affluents de la rive gauche ont déplacé vers le Nord des augites que nous n'avons trouvées que dans une basse terrasse de + 2 m. (échantillon E 4 - fig. 2).

A la suite de ce dernier remaniement, les augites fasciculées qui sont très fragiles ont disparu. Les augites denticulées seules ont été conservées, mais leurs épines distales sont émoussées. Les alluvions des hautes terrasses du Loing (F 9 et 13 - fig. 1) ont cette singularité de ne contenir que des éléments d'origine granitique. Les augites font défaut.

A 2 m. au-dessus de l'étiage (échantillon n° 64 - fig. 1) les augites et les grenats sont par contre très abondants.

Il faut donc envisager que le dernier déplacement des augites est plus tardif que ne l'ont pensé GIRESSE et LARSONNEUR (1970 - p. 58).

Une Loire pliocène empruntant la vallée actuelle du Loing a toujours heurté les auteurs. Cette hypo-

thèse n'est pas nécessaire. Le passage a pu être indirect. Il suffit, en effet, de concevoir un premier entrepôt entre Gien et Montargis.

Des déformations du socle ont pu modifier la distribution des pentes de manière à ce qu'un "beau glacis rayonne en direction de Montargis, souligné par l'éventail des affluents du Loing" (GRAS J. - 1964 - p. 213).

IV - ETUDE DES SABLES DE LA MARNE ET DE L'OISE

Nous avons volontairement séparé la Marne et l'Oise des autres affluents de la Seine. Ces deux rivières traversent en effet des dépôts marins de l'Eocène et de l'Oligocène.

A partir de Paris, on trouve dans le chenal de Navigation deux minéraux nouveaux (corindon, anatase) et une association qui conserve une certaine constance (grenat, épidote, hornblende verte).

Le second groupe provient des sables marins de l'Eocène inférieur qui ont une origine nordique.

IV-1 - Sables de la Marne

Les renseignements que nous réunissons ici ont été extraits des travaux de NOUGIER (1960) et de MICHEL (1972).

IV-1-1 - Quartz, calcaires, silex

En amont d'Epernay, la Marne traverse les formations du Jurassique et du Crétacé.

La fraction grossière des sables est formée de

granules calcaires semblables à ceux que nous avons trouvés dans l'Aube et dans l'Armançon. Le quartz -qui est peu abondant- et les silex proviennent de la Craie.

En aval d'Epernay, le sédiment s'enrichit en grains de quartz émoussés-luisants ou ronds-luisants qui proviennent des sables marins de l'Eocène et de l'Oligocène.

IV-1-2 - Minéraux lourds

En amont d'Epernay on trouve, comme dans l'Aube une très forte dominance de minéraux opaques.

En aval les espèces minérales transparentes sont nombreuses et usées (tourmaline, zircon, rutile, sphène, disthène, andalousite et staurotide). Il faut en outre citer que l'anatase et le Corindon n'ont pas encore été rencontrés dans les affluents que nous avons déjà étudiés.

IV-2 - Sables de l'Oise

IV-2-1 - Quartz, calcaires, silex

Les gravelles calcaires proviennent du Jurassique en amont et du Tertiaire en aval.

Les silex proviennent du Remaniement de la Craie.

Les grains de quartz, qui sont de petite taille, sont émoussés-luisants et proviennent de l'Eocène marin.

IV-2-2 - Minéraux lourds

Les espèces minérales de l'Oise (et de l'Aisne) forment une association qui est très voisine de celle de la Marne.

On y retrouve en particulier l'anatase et le corindon titanifère.

IV-3 - Apports de l'Oise et de la Marne

A partir de Paris, les sables de la Seine contiennent parfois à l'état pur des sables marins du Tertiaire et des calcaires à Nummulites qui proviennent des alluvions de l'Oise et de la Marne.

Le cortège minéralogique s'enrichit de deux associations :

- l'anatase et le corindon proviendraient respectivement du Lutétien et de la Craie,

- le grenat, l'épidote et la hornblende verte proviennent des formations marines de l'Eocène inférieur, mais n'ont pas été trouvées dans les alluvions des terrasses.

V - ETUDE DES SABLES DE LA SEINE FLUVIALE

Au fur et à mesure qu'on se déplace vers l'aval, on observe que les sables de la Seine contiennent des minéraux lourds de plus en plus nombreux et de plus en plus variés. Il est possible de déceler tout à tour, les apports de l'Aube, de la Petite Seine, de l'Yonne et du Loing.

Un peu en amont de Corbeil (échantillon SP 2 - fig. 1) les sables résultent du mélange des apports venant du Jurassique, du Crétacé, du Morvan et du Massif Central.

V-1 - Sables en amont de Paris

Nous pouvons donner à titre indicatif la composition des sables d'une basse terrasse de la Seine située à proximité de Corbeil (fig. 1).

V-1-1 - Quartz, feldspaths, calcaires et oolithes ferrugineux

Nous réunissons ici les éléments que nous avons trouvés en grande quantité dans l'un ou l'autre des affluents :

- fragments silicifiés de Mollusques (Aube amont),
- fragments imparfaitement désagrégés de granites (Armançon et Yonne),
- feldspaths roses tachetés de noir (Yonne amont),
- feldspaths roses associés à de la muscovite (Armançon),
- oolithes ferrugineux (Aube amont),
- silex noirs et jaunes du Crétacé supérieur (Petite Seine),
- quartz bipyramidés ou mâclés (Yonne, Armançon, Loing),
- quartz roses transparents (Petite Seine),
- quartz roses opaques (Alluvions de Montargis),
- quartz gris très irréguliers (dominants dans l'Yonne),
- quartz laiteux très irréguliers (dominants dans le Loing),
- feldspaths blancs et altérés (Loing),
- quartz jaunes et très irréguliers (Hautes terrasses du Loing),
- calcaires lithographiques, biodétritiques et oolithiques du Jurassique (Aube, Armançon, Yonne),
- fragments anguleux de meulière (Seine).

V-1-2 - Minéraux lourds

- zircon, rutile, disthène, tourmaline (Crétacé),
- grenat, hornblende verte fibreuse (Morvan),
- hornblende brune, augite denticulée (Massif Central).

V-2 - Sables en aval de Paris

En aval de Paris nous avons fait des prélèvements au cône BERTHOIS dans l'axe du chenal de Navigation.

Les échantillons sont assez régulièrement répartis de Paris à Tancarville (fig. 1 à 7).

Les sables fluviatiles s'étendent jusqu'à Biessard (fig. 6) et sont caractérisés par l'absence totale d'apports marins venant de l'embouchure.

V-2-1 - Composition des alluvions du chenal de Navigation

Les alluvions de la Seine sont très variables d'un point à l'autre :

- dans 65 % des cas, le sable forme plus de 50 % de l'ensemble,

- dans 10 % des cas les sables et graviers forment plus de 50 % de l'ensemble,

- dans 6 % des cas les vases forment plus de 50 % de l'ensemble.

On peut dire qu'en général le sédiment devient graveleux à la pointe des îles et vaseux dans le bief des barrages.

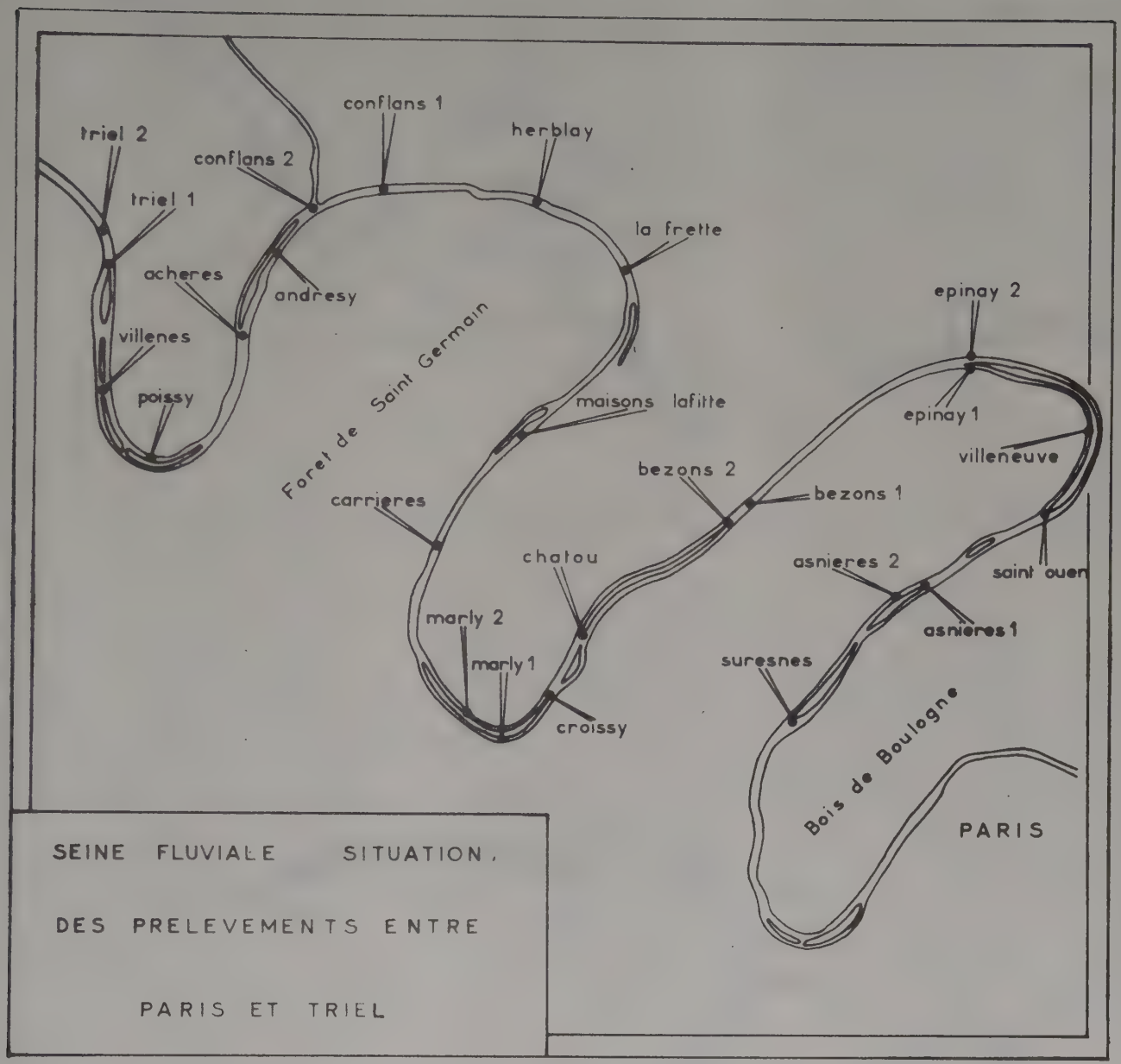

triel 2
triel 1
conflans 2
conflans 1
herblay
la frette
acheres
andresy
villenes
poissy
Foret de Saint Germain
maisons lafitte
carrieres
bezons 2
bezons 1
epinay 2
epinay 1
villeneuve
saint ouen
asnieres 2
asnieres 1
chatou
marly 2
marly 1
croissy
suresnes
Bois de Boulogne
PARIS
SEINE FLUVIALE SITUATION.
DES PRELEVEMENTS ENTRE
PARIS ET TRIEL

Fig. 3

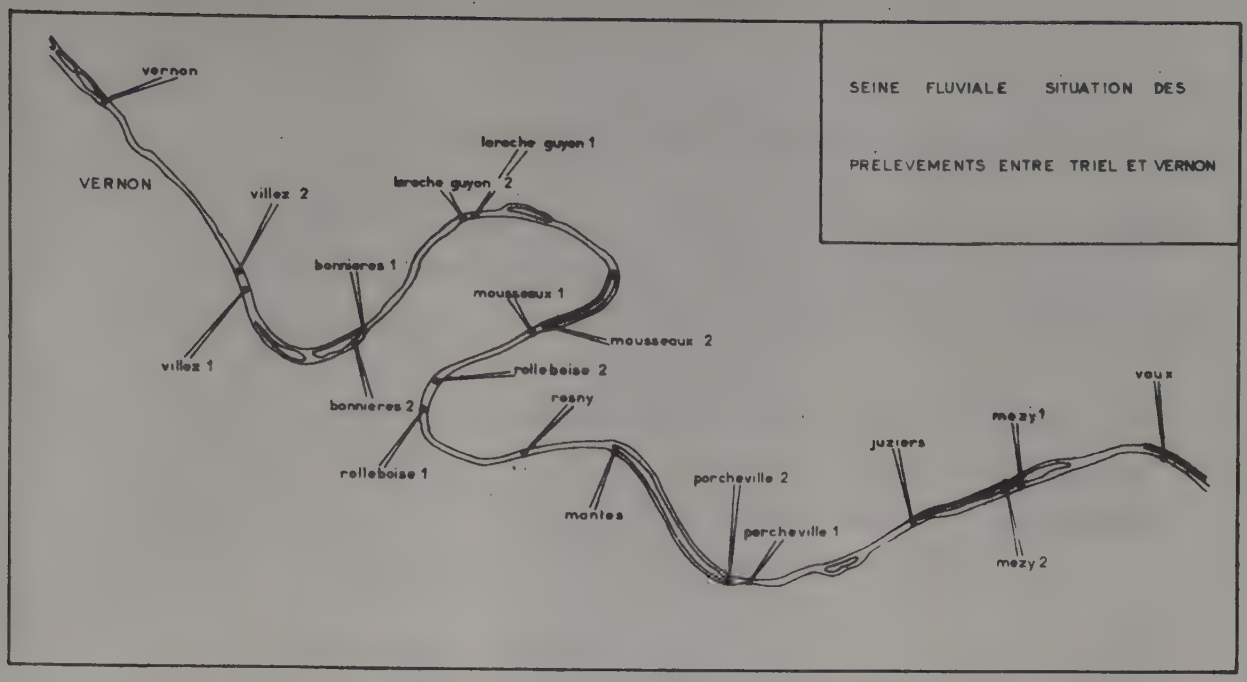

SEINE FLUVIALE SITUATION DES
PRELEVEMENTS ENTRE TRIEL ET VERNON
vernon
VERNON
villez 2
villez 1
larroche guyon 1
larroche guyon 2
bonnieres 1
bonnieres 2
mousseaux 1
mousseaux 2
rolleboise 2
rolleboise 1
rosny
mantes
porcheville 2
porcheville 1
juziers
mezy 1
mezy 2
vaux

Fig. 4

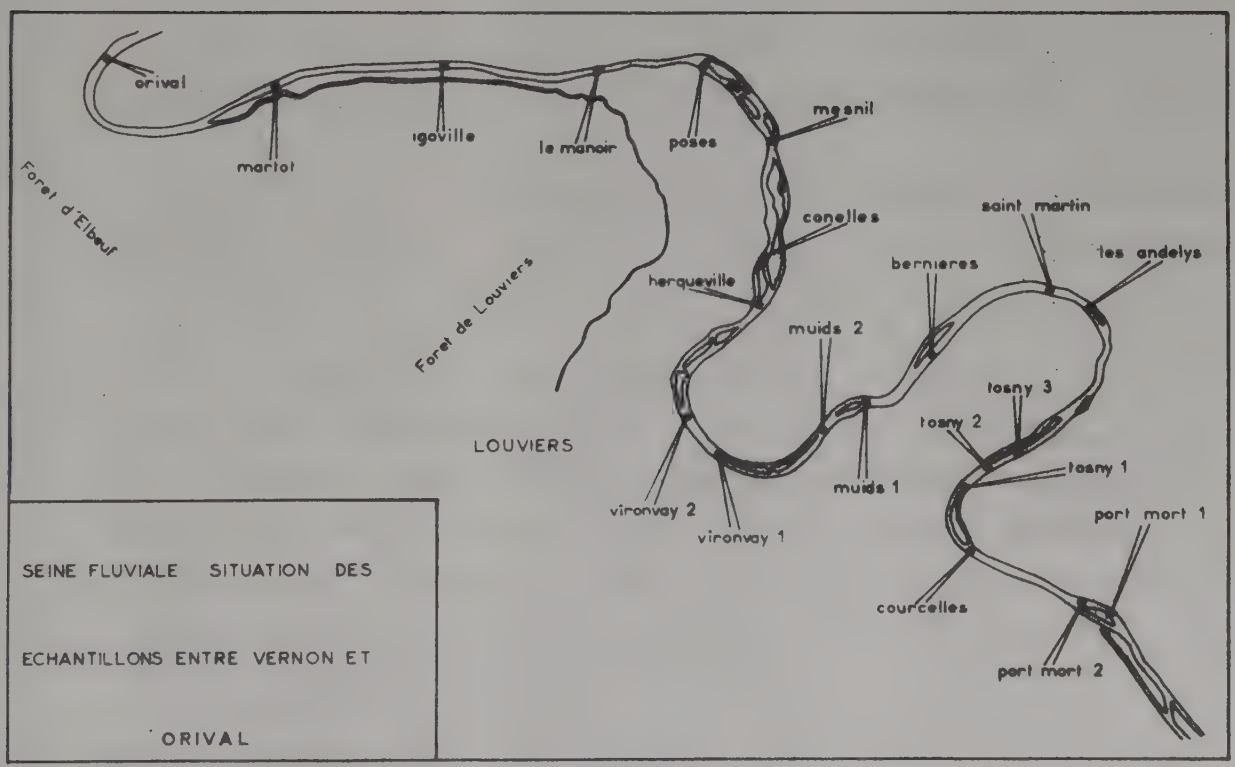

orival
martot
igoville
le manoir
poses
mesnil
canelles
saint martin
les andelys
bernieres
herqueville
muids 2
muids 1
tosny 3
tosny 2
tosny 1
port mort 1
port mort 2
courcelles
vironvay 2
vironvay 1
LOUVIERS
Foret d'Elbeuf
Foret de Louviers
SEINE FLUVIALE SITUATION DES
ECHANTILLONS ENTRE VERNON ET
ORIVAL

Fig. 5

V-2-2 - Etude qualitative des particules sableuses

Après lavage tous les échantillons ont été examinés à la loupe binoculaire. Ils ont au préalable été divisés en un certain nombre de fractions (2-1 mm, 1-0,5 mm, 0,5-0,25 mm).

Cette fragmentation permet en général d'observer séparément les calcaires du Jurassique (fraction grossière) les éléments "granitiques" (fraction moyenne) et les sables marins du Crétacé et du Tertiaire (fraction fine).

Nous avons trouvé en aval de Paris les gravelles calcaires que nous avons décrites en étudiant l'Aube, l'Yonne et l'Armançon.

Après le confluent de la Marne le phénomène le plus important semble être l'apparition des sables et des calcaires du Tertiaire.

Les calcaires sont grossiers et contiennent des Nummulites ou bien sont compactes et formés de Milioles.

On doit également attribuer au Tertiaire les fragments de meulière sans qu'il soit possible de séparer ceux qui viennent de Beauce et ceux qui viennent de Brie.

Dans la fraction moyenne (0,5 à 2 mm) on trouve surtout des quartz anguleux qui viennent soit du Morvan, soit du Massif Central. Les feldspaths roses sont luisants et ne sont jamais altérés. Les sables qui ont une dominance "morvandelle" en sont si riches qu'ils deviennent roses. Les feldspaths blancs et altérés sont très rares. La fraction fine 50-100 microns du sédiment contient de grains de quartz qui sont non usés ou émoussés luisants. Les premiers semblent venir de la Craie et les seconds des formations marines du

Tertiaire, ils sont alors accompagnés de Foraminifères en parfait état de conservation (Suresnes, Marly).

Très souvent nous avons trouvé en surface un tuf d'eau douce qui est blanc ou jaunâtre, friable et caverneux. La faune qu'il contient varie d'un point à l'autre (Planorbes, Limnées, Unio, Dreyssensia, Néritina ...).

Ces différents constituants sont mélangés en des proportions qui ne varient pas d'une manière ordonnée. Les gravelles du Jurassique et les "granits" du Morvan ne présentent aucune évolution longitudinale ordonnée.

Il est important de remarquer que dans les chenaux actuels, nous n'avons jamais rencontré de galets d'origine lointaine, qu'ils soient calcaires ou éruptifs. Nous savons cependant que ces galets existent dans des terrasses plus ou moins anciennes (MICHEL J.P. - 1969 - p. 63 et 64 et 1967).

La Seine qui a élaboré les méandres actuels était donc déjà diminuée.

V-2-3 - Répartition dimensionnelle des éléments

On peut considérer d'une manière générale que la nature des particules varie en fonction de la taille qu'on considère :

- les grains de 2 à 4 mm sont formés de silex, de granites, de rhyolites, de grès et de calcaires du Tertiaire,

- les grains de 1 à 2 mm sont très souvent des granules de calcaires jurassiques et des feldspaths roses du Morvan,

- les grains de 0,5 à 1 mm sont d'origine granitique (Morvan, Massif Central),

- la fraction 0,1 à 0,5 mm contient en assez grande abondance des sables quartzeux du Tertiaire,

- la fraction 0,05-0,1 mm est riche en glauconie et provient sans doute de la Craie.

V-2-4 - Granulométrie et génèse des sables de la Seine

Nous pouvons admettre que, dans les cas simples, la granulométrie d'un sable complexe peut être imposée par des limites dimensionnelles acquises lors d'une première alimentation (POMEROL Ch. - 1951 - fig. 2, p. 254-255).

Les sables bimodaux (Suresnes, Bezons) proviennent souvent du mélange de sables marins du Tertiaire ou du Crétacé (partie fine) et de sables granitiques (partie grossière).

Les sables simples les mieux classés que nous avons trouvés sont en réalité des sables marins de l'Eocène ou de l'Oligocène (Marly).

V-2-5 - Origine des associations de minéraux lourds

Les associations de minéraux lourds sont aussi variables que les granulométries, et nous n'avons décelé aucune évolution longitudinale. La nature du cortège semble dépendre de celle de l'alimentation (Crétacé, Tertiaire, Jurassique, Morvan, Limagne...).

Dans les cas les plus simples, il est possible de proposer une explication assez sûre :

V-2-5-1 - Sables provenant du Tertiaire

L'échantillon de Marly 2 par exemple est un sable blanc dont les grains sont usés et qui provient sans doute de l'Eocène. Le grenat, l'épidote et la hornblende verte sont très abondants dans la fraction 50-200 microns (63 %). Ces minéraux peuvent provenir du bassin franco-belge (VATAN A. - 1937). On les trouve également sur les côtes du Pays de Caux, de Flandre, de Picardie et de Somme (BILLY C. - 1964 - p. 150).

Les augites sont de petites tailles, non striées et ont un dichroïsme assez prononcé (vert-brun-jaune ...) et ne sont ni denticulées, ni aciculaires. Il ne faut sans doute pas considérer le Massif Central comme la seule origine possible des pyroxènes monocliniques. PUGH en signale en effet sur les rivages de Flandre et de Picardie (1963). Il existe donc des augites continentales qui sont limagnaises et d'autres qui sont marines (ROMANOVSKY V. - 1956 - p. 9).

V-2-5-2 - Sables provenant du Crétacé et du Tertiaire

Dans d'autres cas (Conflans 1 - fig. 3) il semble y avoir un mélange de sables provenant du Crétacé (sable blanc glauconieux) avec des sables marins du Tertiaire. L'importance relative des minéraux nordiques (8 %) est réduite. Les minéraux résistants (rutile, zircon, tourmaline, staurotide) font 74 % de l'ensemble.

V-2-5-3 - Sables provenant du Crétacé, du Tertiaire, du Morvan et du Massif Central

Les échantillons les plus complexes sont les plus nombreux. Les minéraux proviennent du Crétacé, du Tertiaire,

du Morvan et du Massif Central (Suresnes - fig. 3).

La fraction fine contient des minéraux que nous avons déjà rencontrés dans l'Aube et la Petite Seine (tourmalines vertes, zircons usés ...).

Les hornblendes vertes non altérées, les grenats hyalins et les épidotes vertes et jaunes viennent probablement du Tertiaire.

Les zircons zonés, les staurotides et les tourmalines brunes sont abondants dans l'Yonne. Les grenats de grande taille sont aussi abondants près du Morvan que dans le Loing.

Les augites vertes et striées viennent de la Limagne d'Allier.

V-2-6 - Régimes de la Seine et répartition des sables fluviatiles

Il ressort donc de nos observations que la Seine actuelle n'a pas homogénéisé les alluvions sur lesquelles elle repose. De Paris à Mantes, les éléments provenant du Morvan et du Jurassique sont abondants. De Mantes à Rouen, les éléments provenant du Massif Central sont abondants et très grossiers.

Il faut donc admettre que la Seine à méandres n'a fait que remanier les dépôts de plusieurs fleuves antérieurs qui étaient plus puissants et dont les cours ne sont vraisemblablement pas confondus.

TRICART et CAILLEUX considèrent que de nombreuses vallées du bassin parisien sont "à fond plat et à concavité de raccordement aux versants".

Les apports latéraux s'ils sont abondants ne peuvent être déplacés sur de longues distances car les crues ont une capacité de transport réduite (TRICART et CAILLEUX - p. 267). Ceci explique que les sables marins du Tertiaire puissent paraître aujourd'hui si irrégulièrement répartis.

Les apports longitudinaux sont au contraire grossiers et d'origine lointaine. Il faut donc admettre que "le régime à chenaux divagants s'est produit au centre" d'une large vallée dont les bords étaient à peu près protégés (op. cit. p. 267).

Le passage de la rivière à chenaux anastomosés à la rivière à méandres est sans doute dû à de légères variations d'origine tectonique ou climatique (LEOPOLD et al. - p. 328). La plaine fluviale passe alors de l'érosion au dépôt ou inversement.

VI - ETUDE DES SABLES DE LA SEINE FLUVIO-MARINE

La Seine fluvio-marine s'étend de Biessard à Vieux-Port (fig. 39).

Nous donnons à cette appellation une signification exclusivement dynamique et sédimentologique.

La propagation de la marée entre Tancarville et Rouen, fait remonter les sables marins qui couvrent, d'une très mince couche les sables fluviatiles grossiers.

Nous estimons que dans cette zone (fig. 39) les apports marins actuels forment un dépôt dont l'épaisseur est inférieure à 30 cm.

Les prélèvements au cône peuvent donc atteindre la

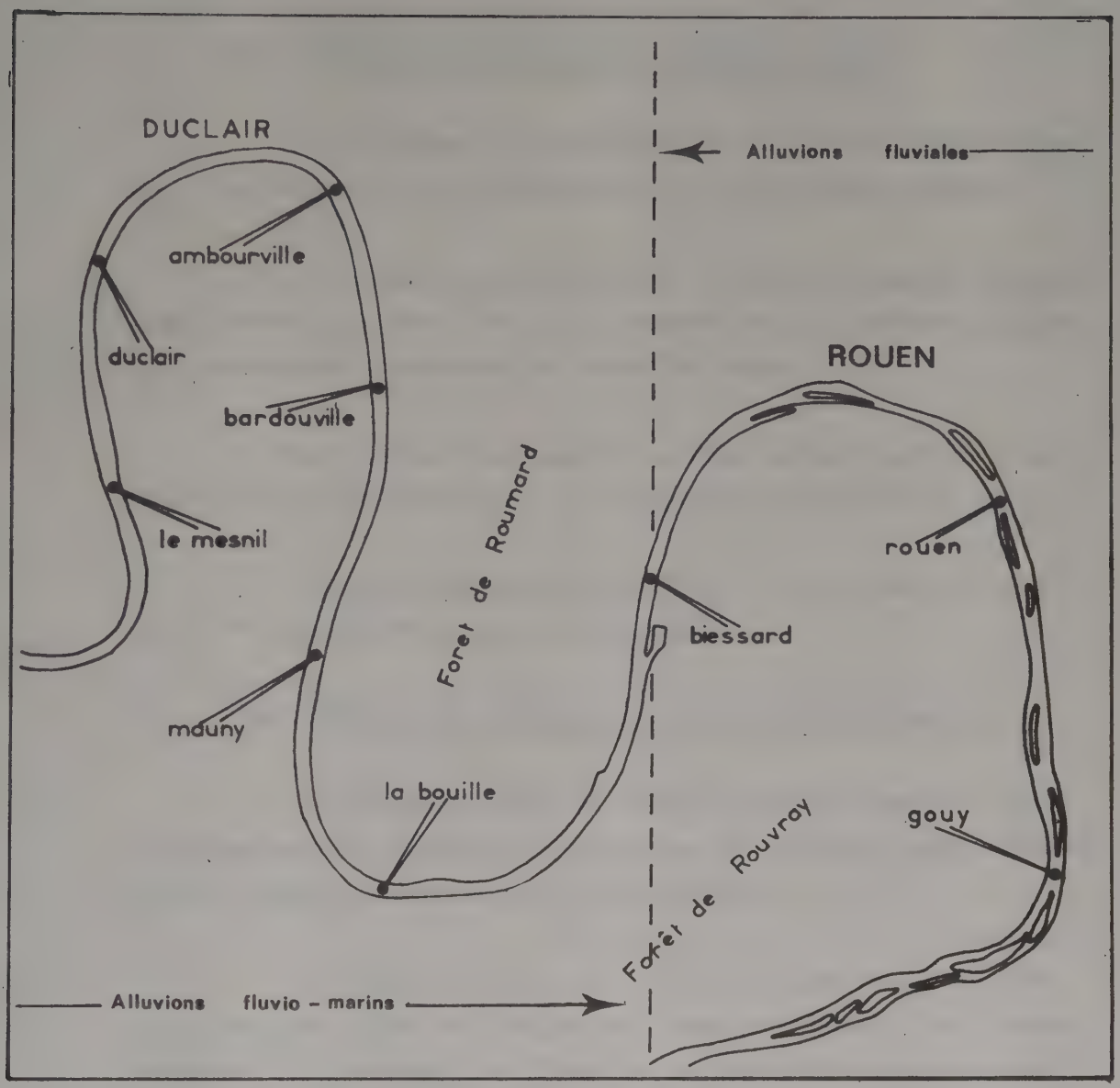


Fig. 6 . Situation des Prélèvements entre Orival et Jumiege

couche sous-jacente qui est d'origine continentale.

VI-1 - Définition des sables fluvio-marins

Les sédiments fluvio-marins sont caractérisés par une fraction fine qui est actuelle et d'origine marine.

Les fractions grossières sont fluviales et présentent toutes les variétés granulométriques et minéralogiques que nous avons décrites en amont de Rouen.

La limite des apports marins actuels est indiquée par les Foraminifères qui ne dépassent pas Biessard (fig. 6).

En aval de Vieux-Port (fig. 7) nous ne trouvons plus d'éléments fluviatiles fossiles.

VI-2 - Nature et origine des sables fluvio-marins

Au-dessus de 100 ou 125 microns les quartz, les feldspaths, les gravelles calcaires et les silex sont identiques à ceux que nous avons déjà décrits.

La fraction fine est d'autant plus riche en éléments marins qu'on se rapproche plus de Tancarville. Entre Biessard et Bardouville (fig. 6) les éléments marins sont très rares et ont une répartition très irrégulière.

A partir d'Ambouville on voit apparaître un sablon riche en Foraminifères actuels.

Ces sablons se déplacent en suspension pendant les vives-eaux et se déposent très vite, car ils sont dépourvus de matière organique (GERMANEAU J. - 1969 - p. 86).

Nous pensons que dans l'axe des chenaux et hors de la zone d'action des houles, les particules de petite taille qui ne sont pas incorporées aux flocons se déplacent peu à peu vers l'amont.

Nous savons en effet, que la mise en suspension des sables à partir du fond est extrêmement rapide et brève. Elle se produit au moment du maximum de vitesse du courant (GROUEL A.P. - 1970 - p. 218). Dans ces conditions et si les particules sont en contact avec le fond, le déplacement se fait, non vers l'aval, mais vers l'amont (IPPEN A.T. - 1966 - p. 650).

VI-3 - Evolution des apports marins entre Vieux-Port et Biessard

Les particules d'origine marine sont d'autant plus nombreuses et d'autant plus grossières que le point est situé plus en aval.

Les minéraux lourds suivent la même évolution.

Nous avons étudié le cortège dans cette partie du fleuve en le divisant à l'extrême (50-63, 63-80, 80-100 microns).

Nous avons constaté les phénomènes suivants :

- entre La Bouille et Duclair (fig. 6) les minéraux lourds d'origine marine sont de petite taille et peu nombreux (hornblendes vertes). Les minéraux de grande taille sont fluviatiles (augite, anatase bleue ...),

- à partir de Le Mesnil apparaissent de petites épidotes vertes ou jaunes et les hornblendes se multiplient,

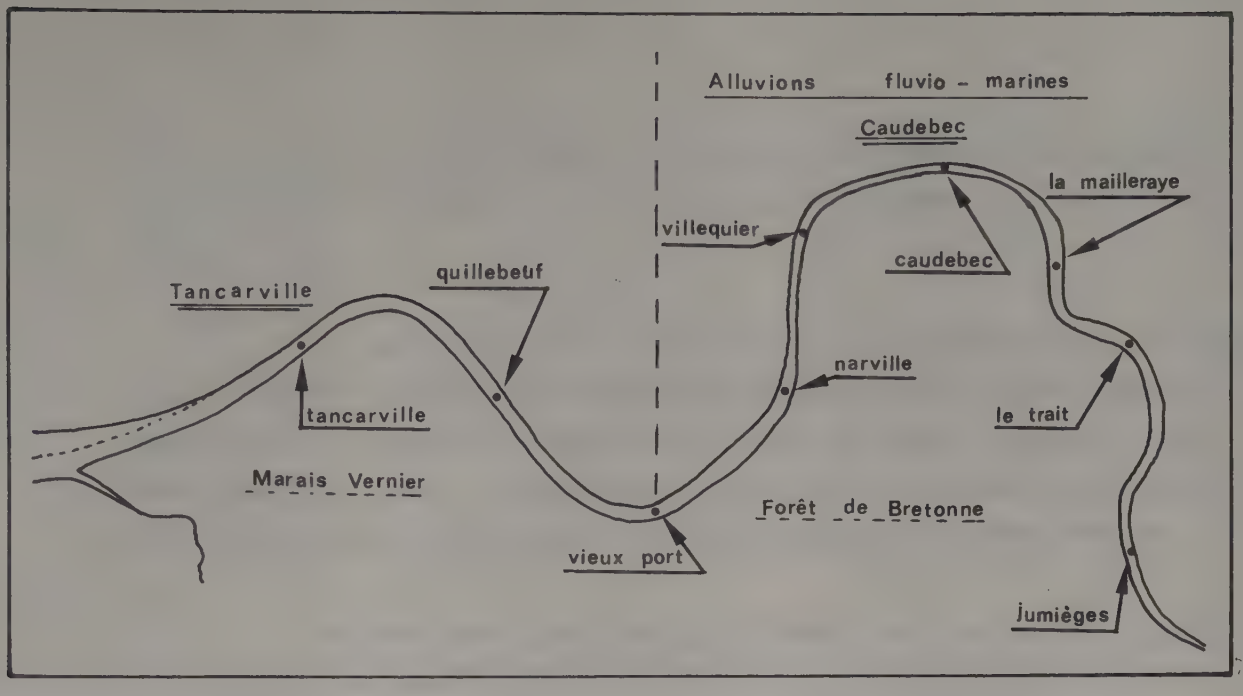


FIG.7.— Seine fluviale.- Situation des prélèvements entre Jumièges et Tancarville

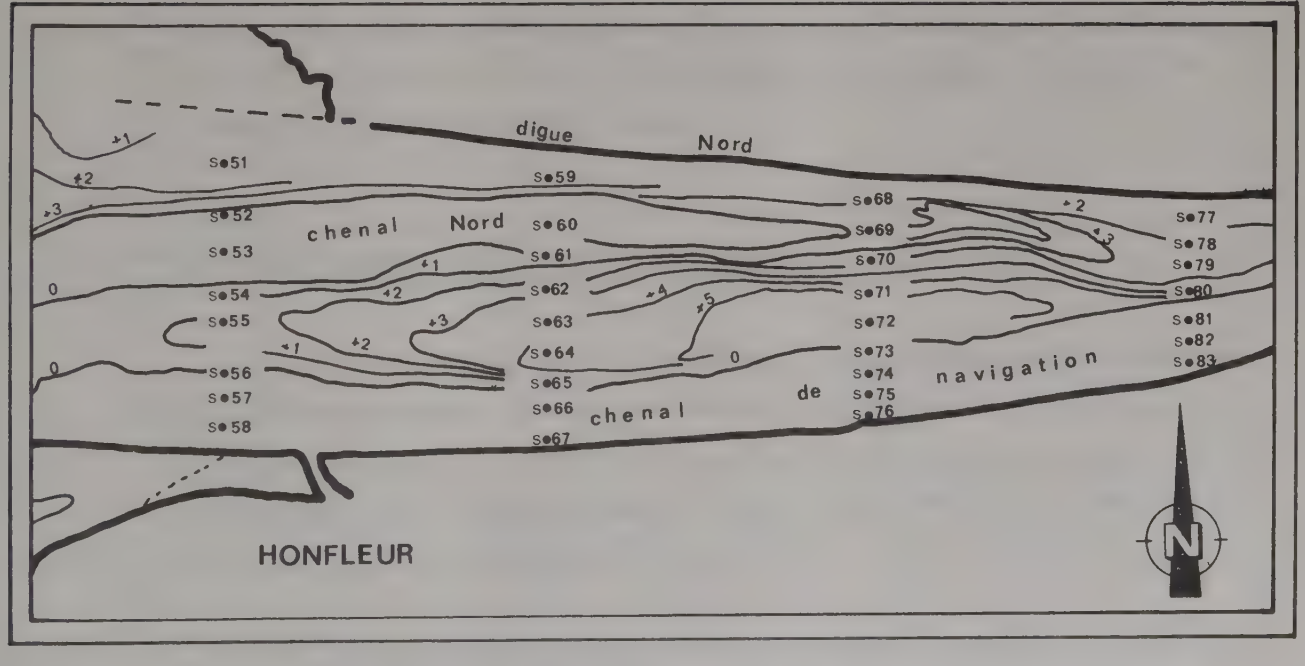


FIG.8.— Situation des prélèvements entre Honfleur et la Risle

- à La Mailleraye, les amphiboles deviennent grossières (100-200 microns) et les épidotes deviennent plus nombreuses,

- à Quilleboeuf, les dépôts de sables marins sont latéraux et contiennent un cortège identique à celui qu'on trouve à Caudebec et qui est classique en baie de Seine (grenat, épidote, amphiboles). L'influence fluviatile n'est pas totalement effacée, puisque nous avons trouvé quelques anatases bleues.

On peut donc conclure en disant que les alluvions fluvio-marines contiennent une fraction grossière qui est immobile et une fraction fine (sablons) qui est actuelle et d'autant plus riche en Foraminifères et en minéraux marins que l'on est plus près de Vieux-Port.

Cette fraction fine se déplace vers l'amont sous la forme d'une suspension semi-permanente (GERMANEAU J. - 1969 - p. 80) qui parvient à dépasser la limite atteinte par la marée saline.

Latéralement, ces sablons se déposent en se mêlant à une fraction très fine (suspension permanente) qui est en grande partie d'origine fluviale.

VII - ETUDE DES SABLES DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE

L'estuaire de la Seine est en grande partie couvert de sables qui sont d'origine marine et qui sont actuellement transportés vers l'amont par les houles et les courants. La complexité de la sédimentation entre Tancarville et Le Havre nous oblige à utiliser un artifice.

Nous considérerons tout d'abord l'ordonnance des sa-

bles qui ont été prélevés sur le fond en écartant les sablons et les vases qui appartiennent aux suspensions. Celles-ci, en rapport étroit, avec le déplacement des masses d'eau seront étudiées dans le paragraphe suivant.

Les sédiments que nous examinerons en premier lieu ont été prélevés dans une partie de l'estuaire où l'énergie des houles et des courants varie de l'aval vers l'amont (fig. 8). Nous obtenons donc assez aisément une image des cheminements.

VII-1 - Déplacement vers l'amont des sables marins entre Le Havre et la Risle

A partir de Tancarville (fig. 7) tous les sables qui ont été prélevés sont marins. A l'opposé de ce que nous avons observé plus en amont, seuls ici peuvent être fluviaux, les sablons et les vases qui se déposent temporairement ou définitivement sous forme de banquettes latérales.

Les échantillons ont été prélevés selon des profils rectilignes qui sont perpendiculaires à l'axe des chenaux (fig. 8).

Afin de bien mettre en évidence la remontée des sables qui se déplacent par roulement ou saltation, nous avons utilisé une méthode de répartition fractionnée qui donne une bonne illustration des phénomènes (GERMANEAU J. - 1967 - p. 10).

VII-1-1 - Répartition horizontale du quartz

Nous voyons (fig. 9) que les sables marins entreposés au large par les houles d'Ouest pénètrent dans les chenaux. Les fractions fines ont tendance à se déposer latéralement (fig. 10).

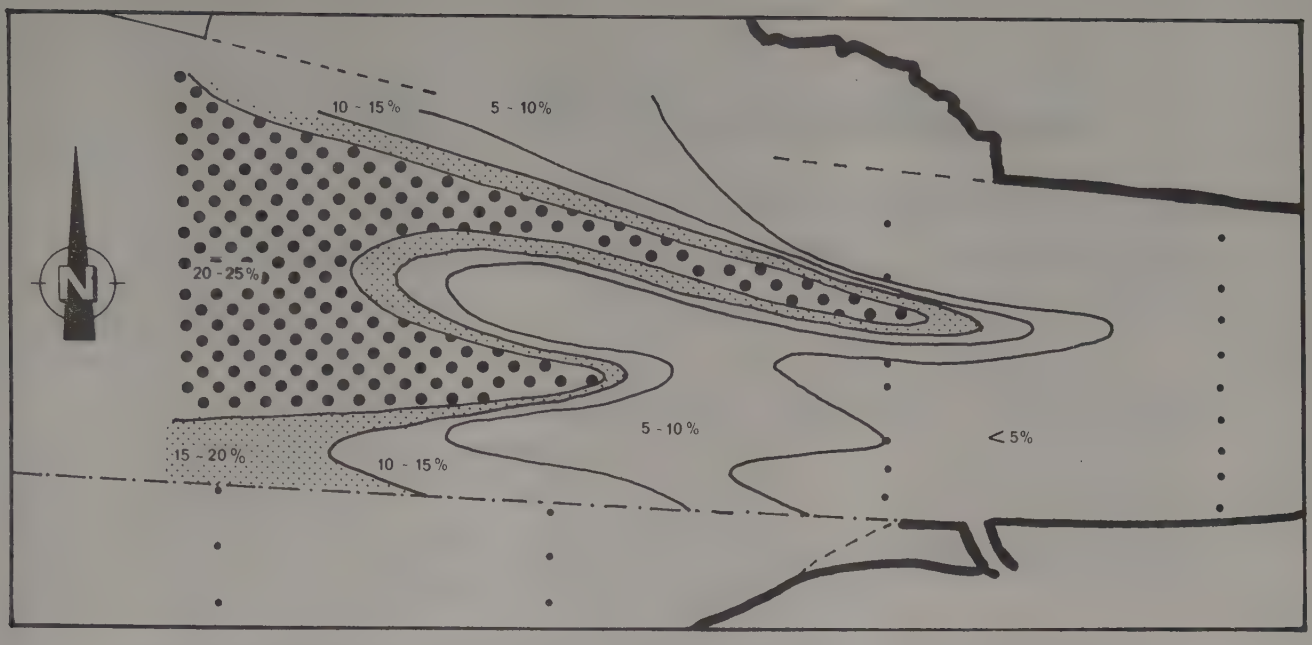


FIG. 9. — Répartition horizontale de la fraction 250 - 315 microns

POURCENTAGE PAR RAPPORT AU TOTAL

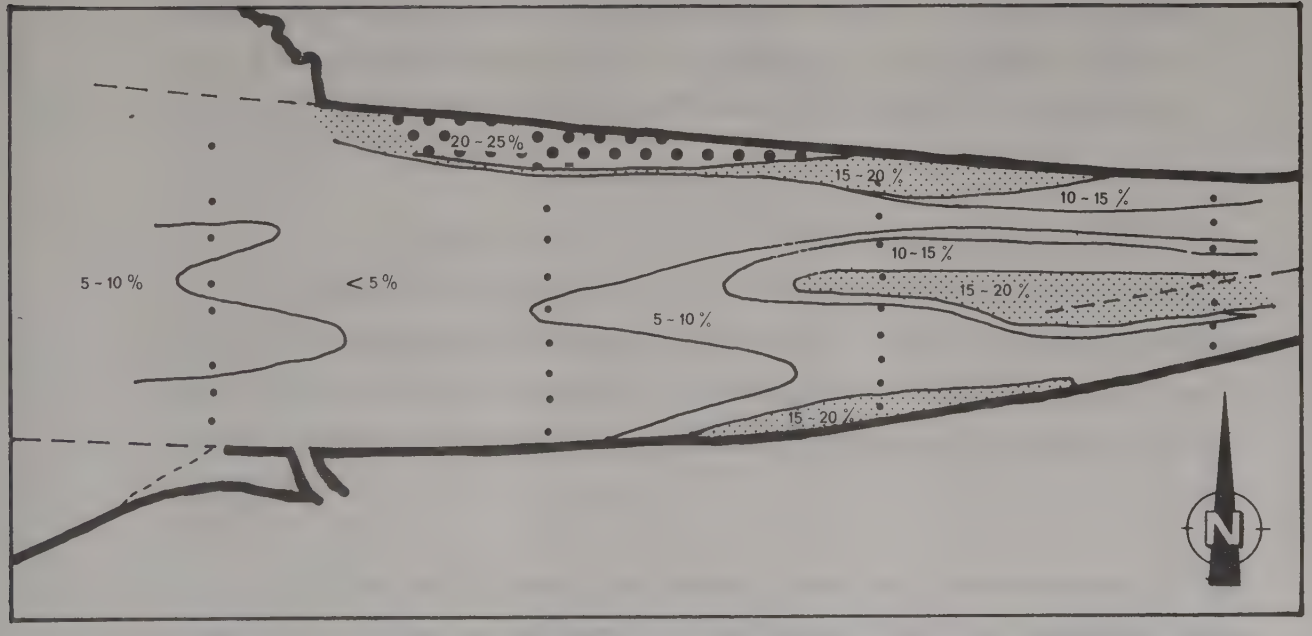


FIG. 10. — Répartition horizontale de la fraction 80 - 100 microns

VII-1-2 - Minéraux lourds caractéristiques

Les minéraux lourds ont une répartition qui dépend de la granulométrie du quartz (GERMANEAU J. - 1968 - p. 34-35).

Dans la zone que nous considérons, les plus importants sont les suivants :

- grenat, épidote, sphène, tourmaline, hornblende verte, zircon et staurotide.

Il est très important de remarquer que l'association marine forme plus de 50 % du cortège total.

VII-2 - Pénétration des sables du large dans l'estuaire

A partir des fonds de 1 à 3 m. au large, les sables sont pris en charge par les courants et pénètrent d'abord dans le chenal Nord qui est aveugle (fig. 8). Les matériaux les plus fins franchissent la digue un peu en aval de la Risle et viennent se déverser dans le chenal de Navigation (CHAPON J.P. - 1963 - p. 13).

A partir de cet endroit, ils sont soumis à un transport qui est dirigé vers l'aval et qui s'achève à peu près au niveau de Honfleur (BONNEFILLE et al. - 1966). Le sédiment qui est évacué lors du jusant est susceptible d'être repris par le flot suivant, et repoussé vers le chenal Nord (CHAPON J.P. - 1964).

On voit donc, que même après son aménagement, l'estuaire de la Seine a conservé le caractère d'un estuaire naturel, qui est d'avoir un chenal de flot et un chenal de jusant, que parcourent en un circuit fermé, les particules de quartz de

100 à 300 microns (VAN VEEN - 1950 - p. 49).

Nous ne parlons ici que du comportement des particules qui sont à peu près en équilibre avec les plus fortes vitesses et qui, pour ainsi dire, sont "recyclées continuellement sans évacuation" (BURNS R.E. - 1963 - p. 594-595).

Celles qui sont inférieures à 100 microns peuvent s'échapper vers l'amont ou vers l'aval, suivant qu'elles constituent une suspension permanente ou semi-permanente.

VII-3 - Nature et déplacement des sables entre Trouville et Honfleur

Les sédiments que nous avons étudiés ont été prélevés par les Services Techniques du Port de Rouen au mois d'octobre 1962.

Le long du profil S.04 et S.013, la répartition granulométrique des sables en fonction de la topographie montre que la dérive longitudinale par charriage se fait jusqu'à la profondeur approximative de -4 m. (GERMANEAU J. - p. 28).

Ces sables, qui ont un cortège voisin de celui qu'on trouve sur la côte du Calvados, se déplacent vers l'Est, en empruntant une large surface qui est comprise entre le Banc d'Amfard et la côte. Contrairement à ce qui se passe dans les chenaux, les sables les plus grossiers ont tendance ici à se concentrer sur les reliefs. Cette disposition qui est caractéristique des milieux marins peu profonds, est due à la houle et aux courants.

Dans l'estuaire de la Mersey, dont la morphologie est très voisine de celle de la Seine, on a pu remarquer que le flot, avant d'être entièrement canalisé par les rives des

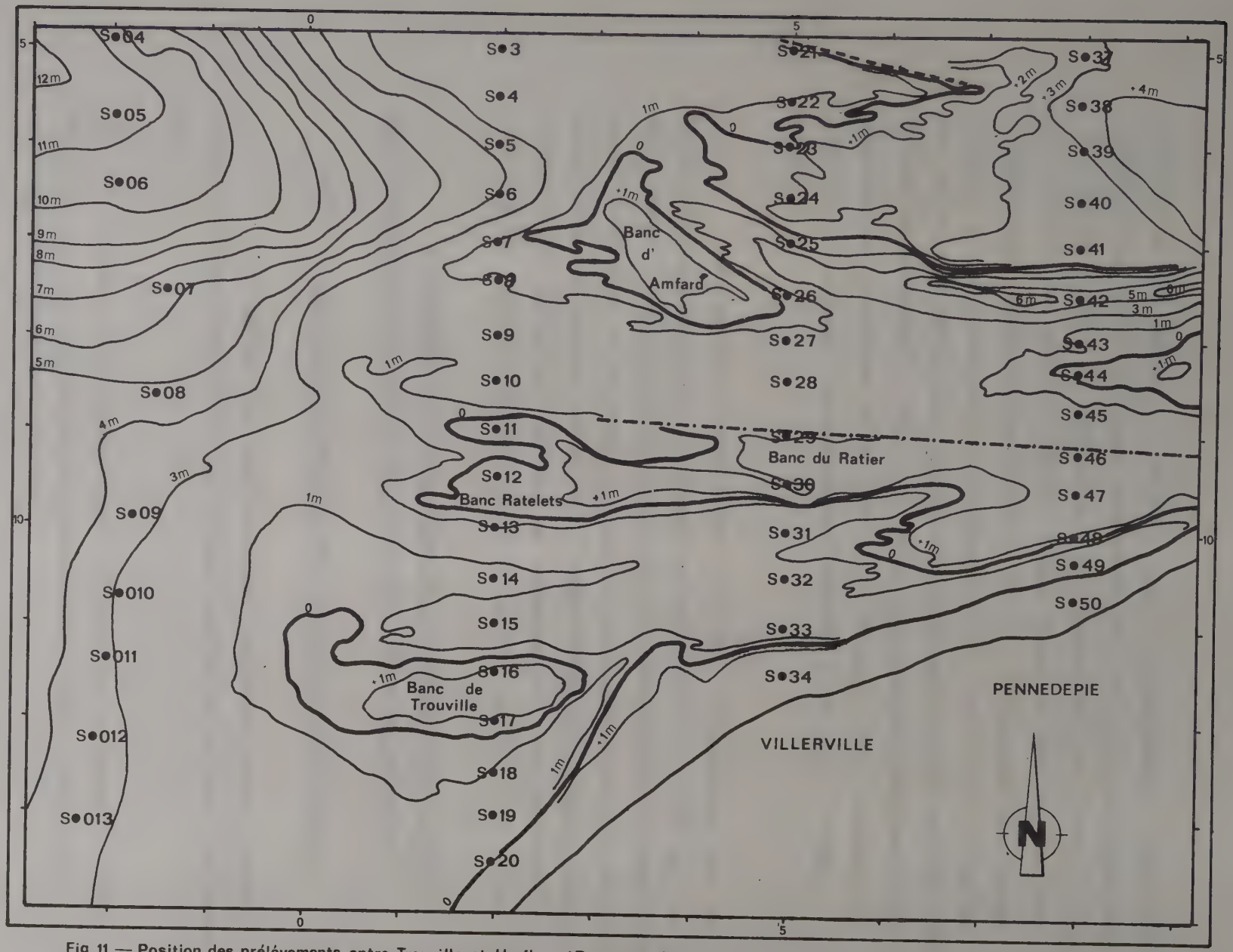


Fig. 11 — Position des prélévements entre Trouville et Harfleur. (Document établi par les services du Port autonome du Havre, octobre 1962.)

chenaux ou les digues, n'emprunte pas nécessairement l'axe des dépressions. Il se propage au-dessus des surfaces immergées selon une direction qui dépend de la propagation de l'onde de marée et de l'inertie des masses d'eau. Dans ce cas là, les vitesses sont d'autant plus élevées que la profondeur est moins grande, et le transport des sables se fait sur toute la surface, selon une direction qui est oblique par rapport aux reliefs (PRICE et HENDRICK - 1963 - p. 488). L'effet du flot dans l'intervalle de la digue du Ratier et du rivage, a été reconnu au moyen des traceurs radio-actifs (BONNEFILLE et al. - 1966 - p. 9).

Les sables franchissent la digue obliquement pour gagner le chenal Nord et le chenal de Navigation. Le mode du quartz est presque toujours situé entre 125 et 200 microns et leur cortège s'enrichit en minéraux légers ou tabulaires, au fur et à mesure qu'on se déplace vers l'Est (amphiboles, chlorites, épidote, tourmaline). Le grenat qui est si abondant en face de Trouville (15 à 30 %) dépasse difficilement le profil S.11 - S.20 (fig. 11).

Le cortège minéralogique de l'estuaire de la Seine est donc élaboré à partir de celui des côtes du Calvados.

VII-4 - Origine des sables de l'estuaire de la Seine

Les sables qui pénètrent par roulement dans l'estuaire de la Seine proviennent en grande partie de la côte du Calvados.

Sous l'effet des houles d'Ouest qui abordent la côte obliquement, les sables se déplacent sur le fond jusqu'à la cote approximative de -5 m.

A partir du méridien de Villerville, ces sables sont pris en charge par les courants de marée et pénètrent lors du

flot dans le chenal Nord. Lors du jusant, les fractions les plus fines de ce matériel, se déplacent vers l'aval en empruntant le chenal de Navigation. Au flot suivant, les particules dont la taille est supérieure à 160 microns sont recyclées.

On peut donc considérer que les sables du Calvados se déplacent en circuit fermé entre le Havre et le confluent de la Risle. Etant donné que les particules de taille moyenne sont prisonnières et ne peuvent pas être évacuées vers le large, tout apport nouveau, à la suite d'une tempête d'Ouest, provoque nécessairement un ensablement des chenaux.

VIII - ETUDE DES SABLES DE LA REGION HAVRAISE

VIII-1 - Origine de la topographie sous-marine de la région havraise

Au large du port du Havre, la topographie sous-marine est très irrégulière (fig. 12).

L'origine de ce modelé doit sans doute être attribuée à un stationnement au niveau de la mer à -10 m.

Les reliefs que constituent le Banc de l'Eclat, les Hauts de la Rade, le Grand Placard et les Hauts de Quarante, sont couverts de galets qui sont actuellement immobiles et font penser aux "pouliers" qui ont été décrits sur les côtes de la Somme.

Cette surface, élaborée lors de la transgression flandrienne, impose des reliefs dans l'intervalle desquels (Petite Rade - fig. 12) se déposent les suspensions de la Seine.

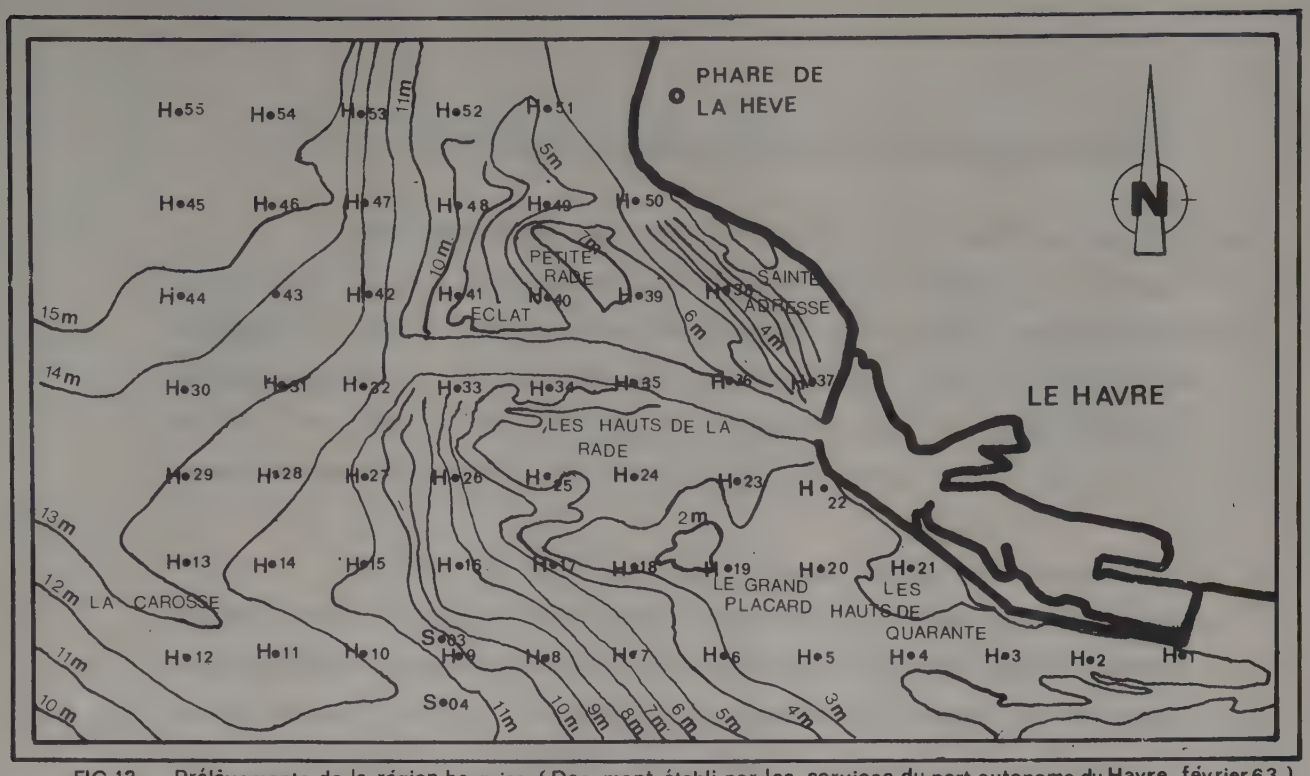


FIG.12 — Prélèvements de la région havraise. (Document établi par les services du port autonome du Havre_février 63)

POURCENTAGE PAR RAPPORT AU TOTAL

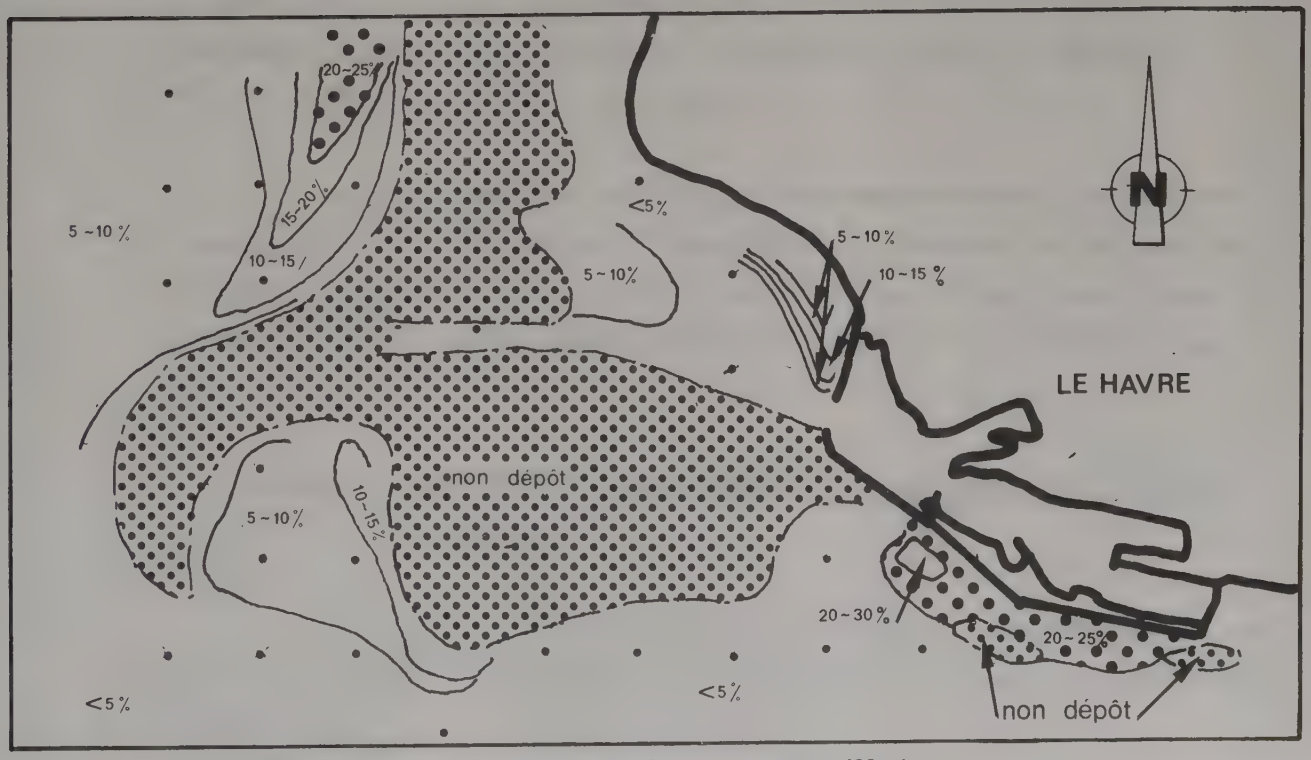


FIG.13 — Répartition horizontale de la fraction 315_400 microns.

VIII-2 - Dérive littorale récente de la Grande Rade

A l'Ouest du Banc de l'Eclat, on trouve à partir des fonds de -12 m. les traces d'une ancienne dérive littorale qui acheminait vers l'estuaire des sables d'origine septentrionale. A une époque où le niveau de la mer était fixé à -10 m. les sables de 200 à 400 microns se déplaçaient du Nord au Sud, sans doute sous l'effet des houles de N.W. (fig. 13).

La dérive du large peut sans doute être considérée comme fossile. La distribution des tailles en fonction de la topographie rappelle d'une manière saisissante celles d'un rivage actuel (fig. 17). Nous savons actuellement qu'au large du Cap d'Antifer, les dépôts quaternaires sont très minces (GUYADER J. et LAPIERRE F. - 1972). Ces dépôts s'épaississent à proximité du Havre, comme cela se produit chaque fois qu'une dérive littorale se heurte à une dépression transversale. Il se forme dans ce cas une accumulation (ALLEN J.B.L. - 1965 - p. 580) qui atteint les dimensions d'un cap sous marin si l'alimentation est suffisante (DJOUNKOVSKI N.N. et BOJITCH P.K. - 1959 - fig. 128 - p. 276).

Cette première dérive a vraisemblablement été interrompue lors de la dernière transgression, lorsque le niveau de la mer a atteint la cote de -50 m. environ. Actuellement une seconde dérive a pris place derrière le Banc de l'Eclat (fig. 13).

VIII-3 - Rabattement des sables du large par les houles actuelles

Au-delà des lignes de déferlement on considère que les houles déplacent les sables fins (100-200 microns) du large vers la côte.

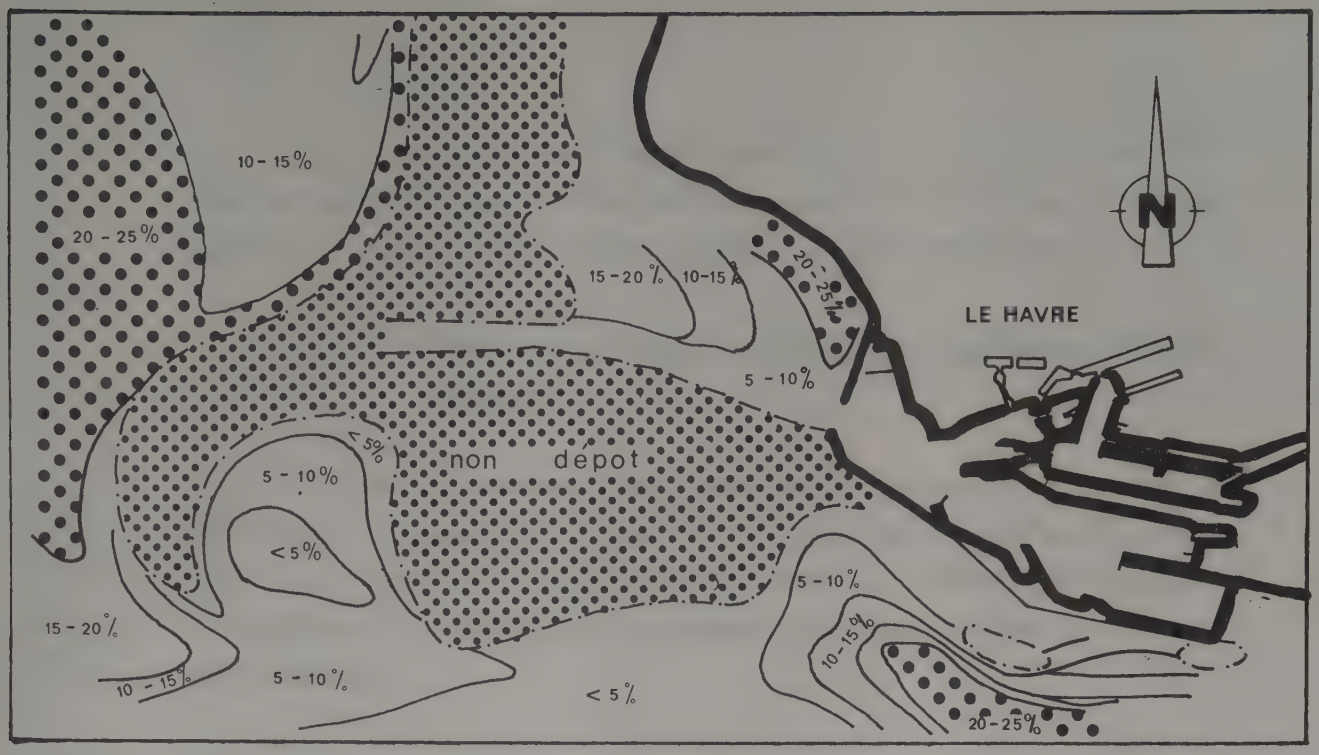


Fig. 14 — Répartion horizontale de la fraction 160-200 microns.

POURCENTAGE PAR RAPPORT AU TOTAL

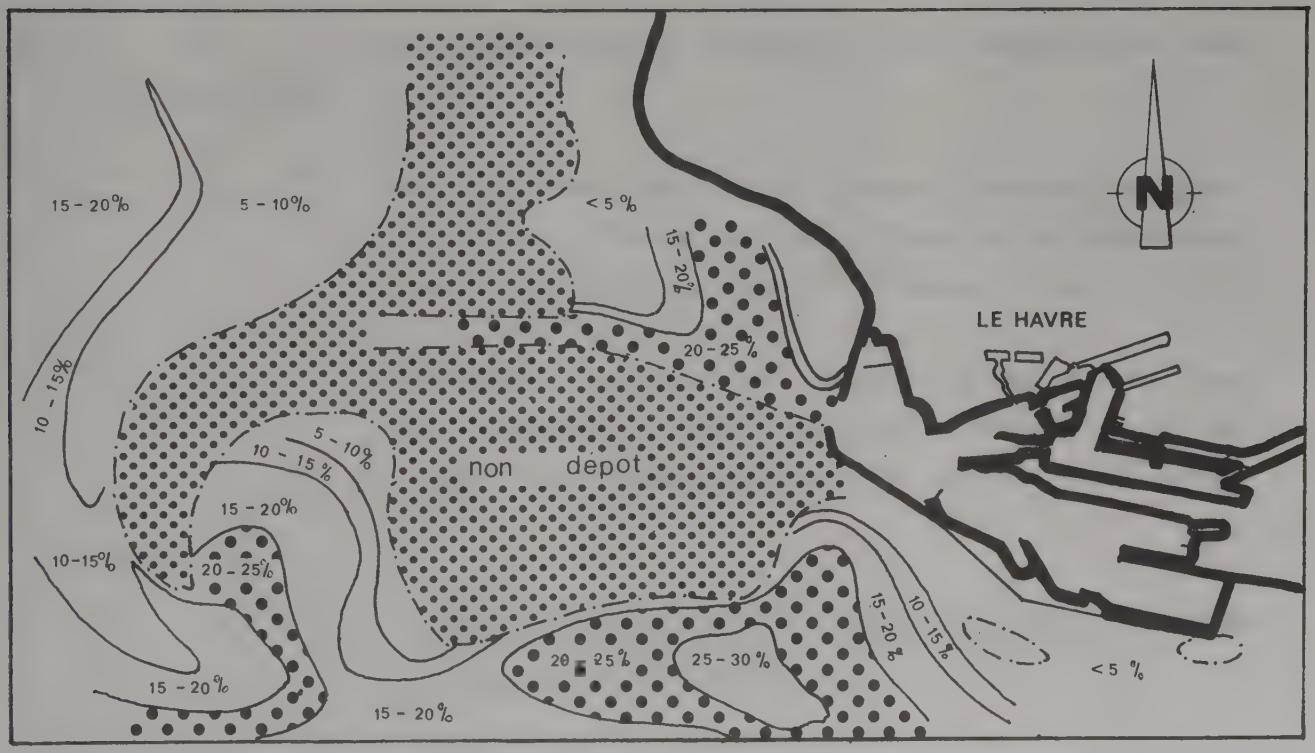


Fig. 15 — Répartition horizontale de la fraction 100-125 microns.

L'étude détaillée du profil H 52 - H 55 (fig. 77) semble indiquer que le sable élémentaire 125-160 microns est actuel et couvre les sables fossiles plus grossiers.

VIII-4 - Dérive littorale actuelle de la plage Sainte-Adresse

Cette dérive a dû prendre naissance il y a 5000 ou 7000 ans, lorsque le niveau de la mer était à -5 m. Ce transfert, qui contourne le Cap de la Hève, a tendance à combler l'entrée de l'avant-Port du Havre avec des sables de 100 à 200 microns.

VIII-5 - Apports du large et apports de la Seine dans la fosse de la Carosse

La fosse de la Carosse constitue vraisemblablement un vestige de l'ancienne vallée de la Seine.

Cette dépression a tendance à être ensablée de deux manières :

- sous l'effet des houles d'Ouest, les sables fins du large se déplacent vers l'Est et ne dépassent pas le méridien du Banc de l'Eclat (fig. 14 et 15),

- lors des vives-eaux et au jusant, les sables fins de l'estuaire se déplacent vers l'Ouest et se déposent très vite au niveau du port du Havre (fig. 15).

VIII-6 - Déplacement des suspensions fluviales et envasement du port du Havre

L'envasement du port du Havre se produit à la fin du

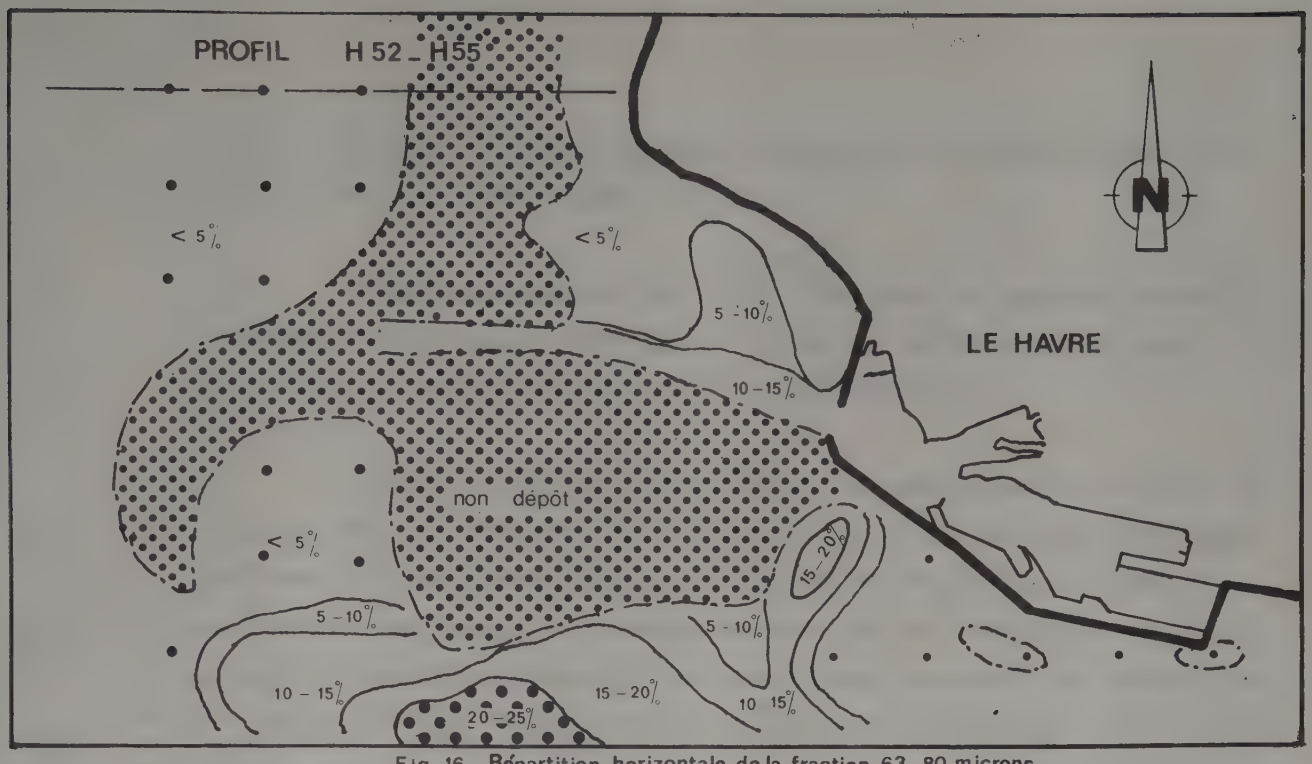


Fig. 16 · Répartition horizontale de la fraction 63_80 microns

POURCENTAGE PAR RAPPORT AU TOTAL

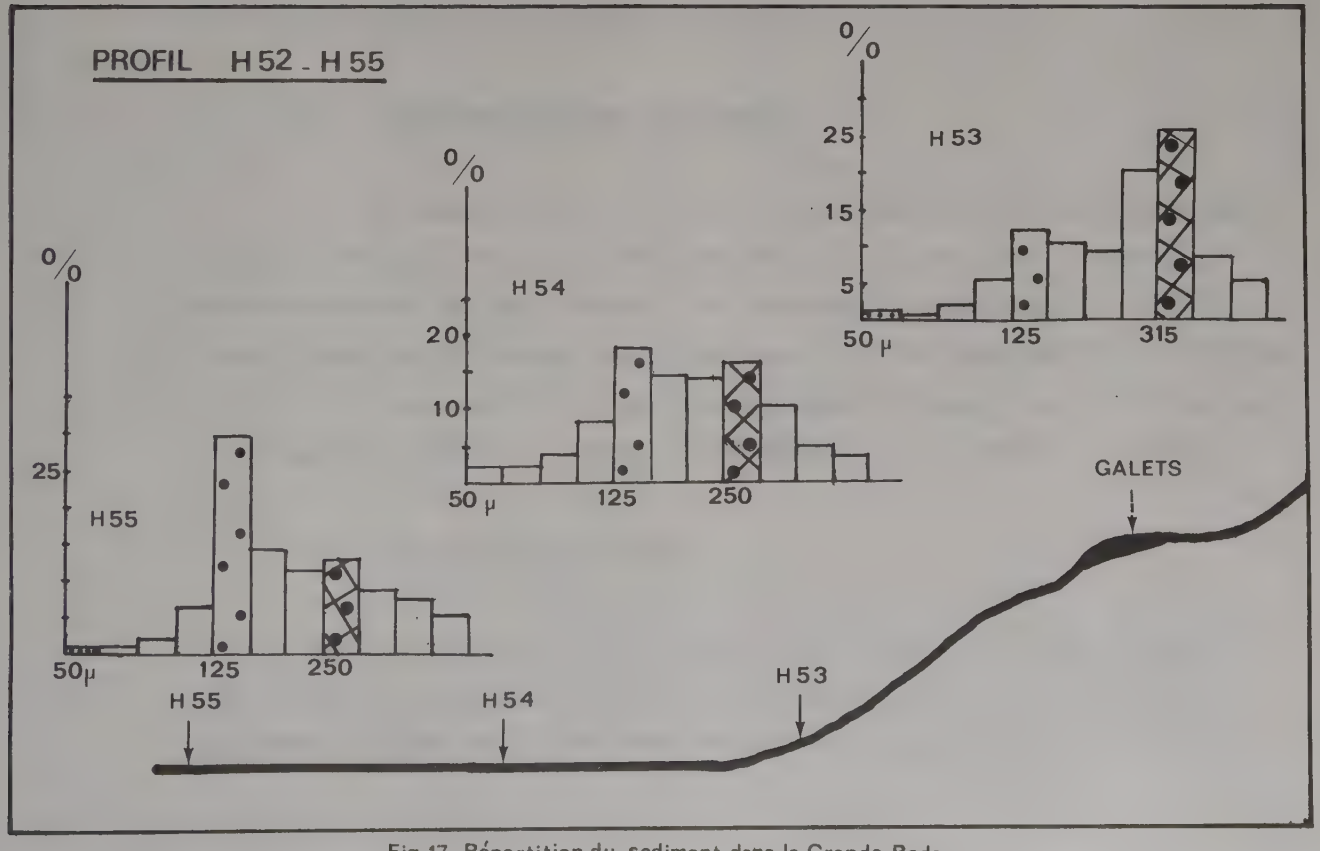


Fig. 17. Répartition du sediment dans la Grande Rade

jusant lorsque les eaux troubles venant de la Seine stationnent à proximité de l'avant-port.

Les suspensions qui sont évacuées en grande quantité lors des vives-eaux contiennent un sable élémentaire, dont le mode est souvent situé entre 63 et 80 microns.

A la sortie de l'estuaire, ce sable, sous l'effet de l'agitation, se détache des flocons et se dépose surtout dans la fosse de la Carosse (fig. 16). Les silts, les argiles et la matière organique fibreuse restent plus longtemps en suspension. Cet assemblage ne se dépose que lorsque la turbulence est nulle, c'est-à-dire dans l'avant-port et le port du Havre.

Le problème de l'élaboration de ces suspensions permanentes, qui sont en grande partie d'origine continentale, ne peut être abordé que par le biais d'une étude hydrologique.

IX - ETUDE HYDROLOGIQUE DE LA SEINE

IX-1 - La marée dans la Manche

La Manche est le siège d'une onde dérivée progressive qui provient de l'Atlantique et qui se propage jusqu'au Pas-de-Calais. A son entrée, et au-dessus des fonds de 90 m. l'amplitude en vive-eau moyenne est de 3 m. (ALLARD P. - 1953 - p. 102). Cette amplitude augmente régulièrement de 5 à 8 m. du Cotentin aux Côtes de Somme (BONNEFILLE R. - 1968 - p. 60).

IX-2 - La marée au Havre

A l'approche de la baie de Seine, la durée du montant devient plus faible que celle du perdant. Au Havre cette dissymétrie qui est très accusée est accompagnée d'une "tenue

du plein" ou bien d'une "double pleine mer" qui devient très sensible lorsque le coefficient de marée est compris entre 70 et 110 (LE FLOCH J.F. - 1961 - p. 45). Pendant une durée qui varie de 2 h. à 2 h. 30 le niveau de l'eau reste presque constant. Si le coefficient est très élevé, il existe une première pleine mer puis une seconde. Le point d'inflexion disparaît lorsque le coefficient est voisin de70 (fig. 18). Sur la côte du Calvados, les caractères de la marée sont voisins de ceux que nous venons d'indiquer. Cette tenue du plein n'est pas limitée aux zones côtières. En Manche centrale et au-dessus des fonds de 40 ou 50 m., on observe une courbe de marée qui fait songer en vive-eau à la double pleine mer du Havre (LACOMBE H. - 1949). ALLARD attribue cette anomalie à un phénomène de résonnance qui résulte de la forme et des dimensions de la Manche orientale (op. cit. p. 97).

IX-3 - Propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine

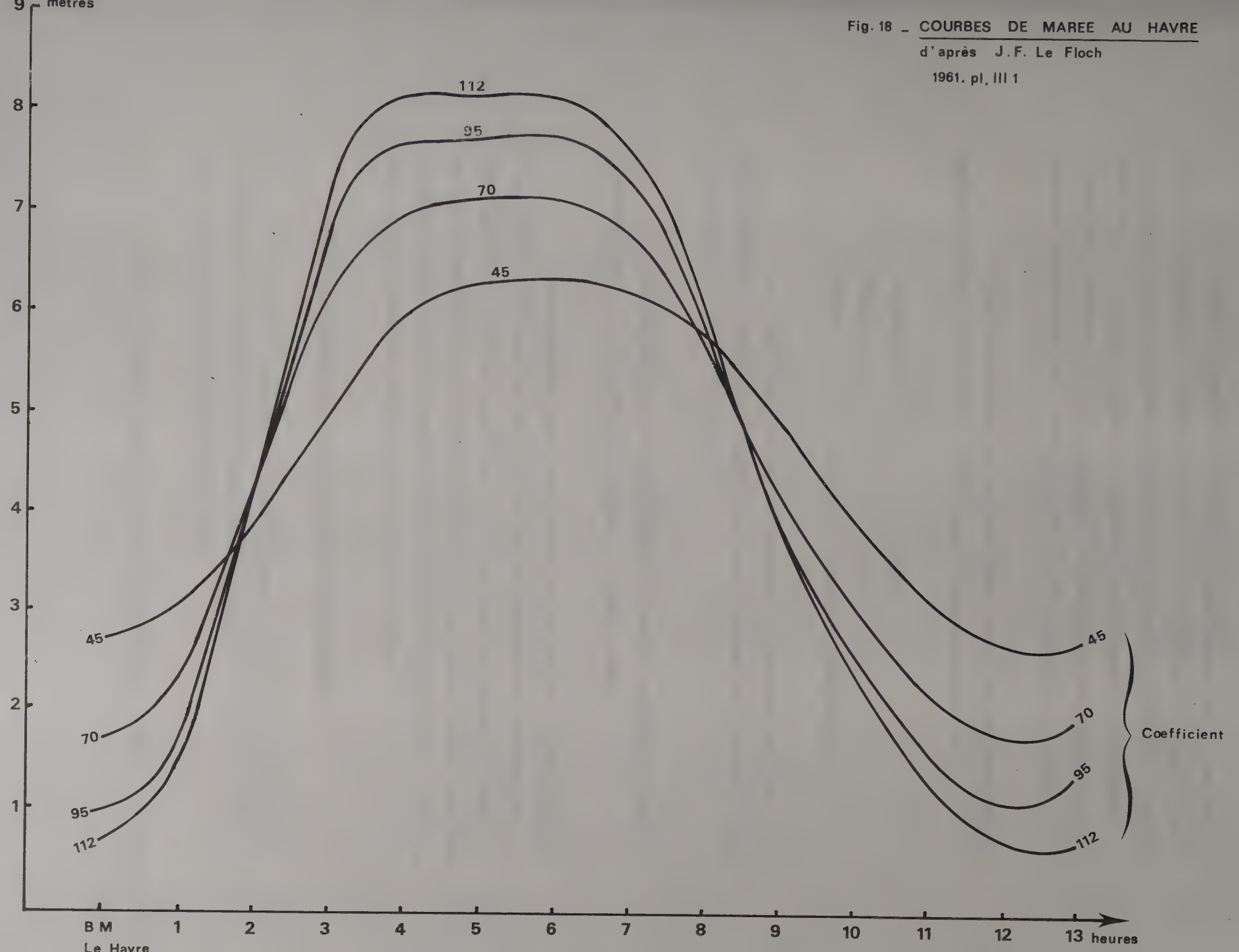
A l'approche de l'estuaire les profondeurs diminuent rapidement. La déformation de la courbe de marée qui était déjà très sensible en baie de Seine, devient plus accusée. Dès l'entrée, l'étranglement du fleuve provoque une augmentation de l'amplitude (GOUGENHEIM A. - 1950 - p. 7). La diminution de la profondeur a d'ailleurs le même effet. Lorsque l'onde de marée se propage dans une direction opposée à celle du courant, la courbe devient dissymétrique (COURTIER A. - 1937 - p. 401). Il faut donc également tenir compte du débit du fleuve.

A l'intérieur de l'estuaire l'évolution se fait de la manière suivante : s'il n'y avait pas de frottements, la convergence des rives et le relèvement du fond provoqueraient une augmentation de l'amplitude.

Fig. 18 _ COURBES DE MAREE AU HAVRE

d'après J.F. Le Floch

1961. pl. III 1



Dans le cas de la Seine, comme dans celui de la Loire (VERGER F. - 1968 - p. 159), les pertes d'énergie sur le fond ne sont pas négligeables, et l'amplitude est conservée dans la partie basse du fleuve. La vitesse de propagation de l'onde-marée est voisine de celle qu'on observe aux abords immédiats de l'embouchure (LE FLOCH J.F. - 1961).

Plus en amont le marnage diminue. Les valeurs maximales citées par CHAPON (1963) sont les suivantes :

Estuaire ..... 8 m.
Rouen ..... 3 m.
Poses ..... quelques décimètres

Le front de l'onde a tendance à devenir de plus en plus raide au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la mer (fig. 19 et 20).

En morte-eau ce phénomène est moins sensible, mais l'évolution se fait toujours dans le même sens.

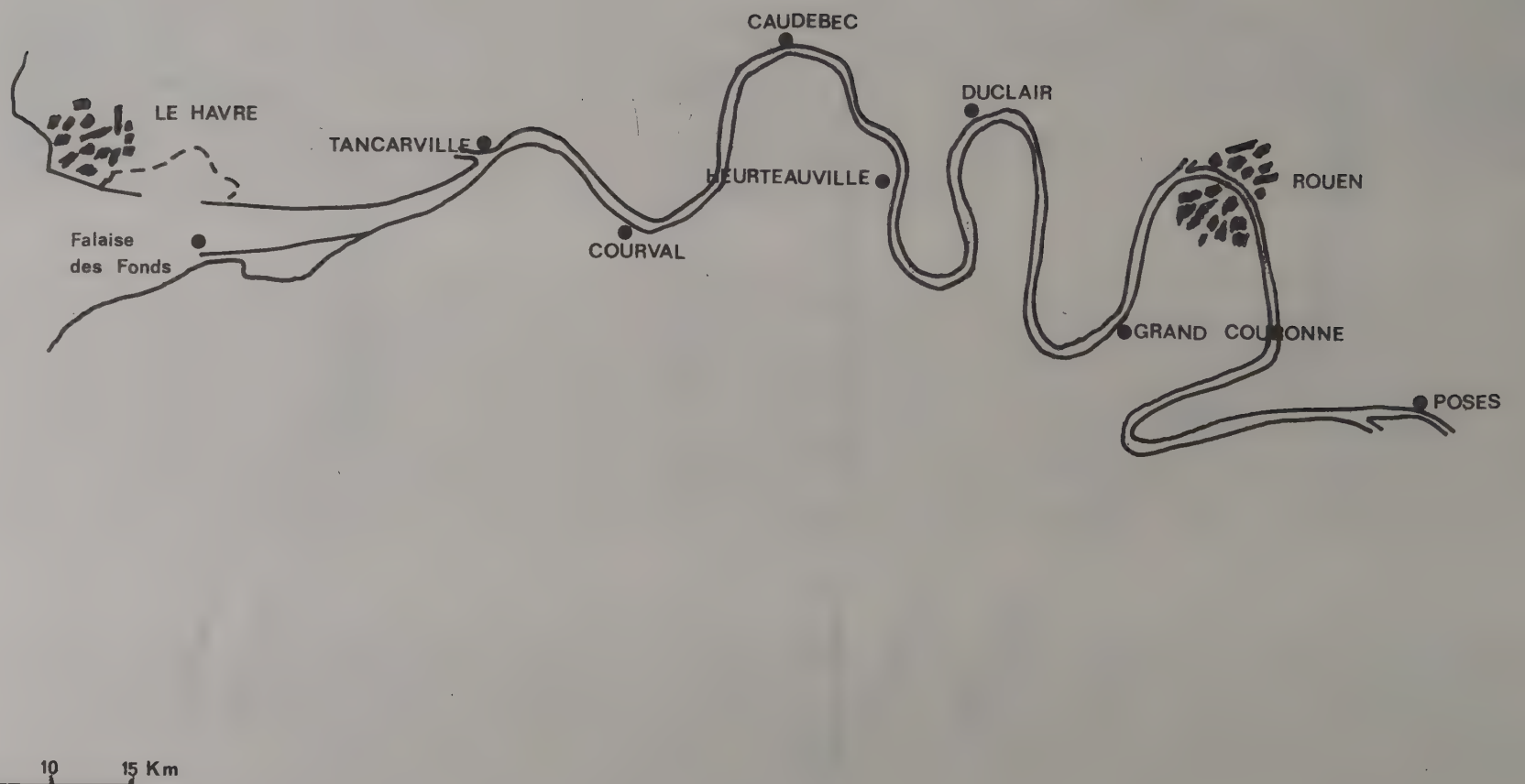
Les courbes que nous avons reproduites correspondent à un débit fluvial de 200 m3/s. Les vitesses du courant de flot sont en général supérieures à celles du jusant. C'est à cette inégalité des vitesses maximales que nous avons attribué le déplacement vers l'amont des particules quartzeuses dont la taille est comprise entre 125 et 200 microns.

IX-4 - Le mascaret et la mise en suspension

La déformation de l'onde peut conduire au cas limite du mascaret. Celui-ci est observé en Seine lorsque le coefficient de marée est supérieur à 100.

Par analogie avec les oscillations de l'eau à proximité

Fig.19 . Plan de Situation des marégraphes



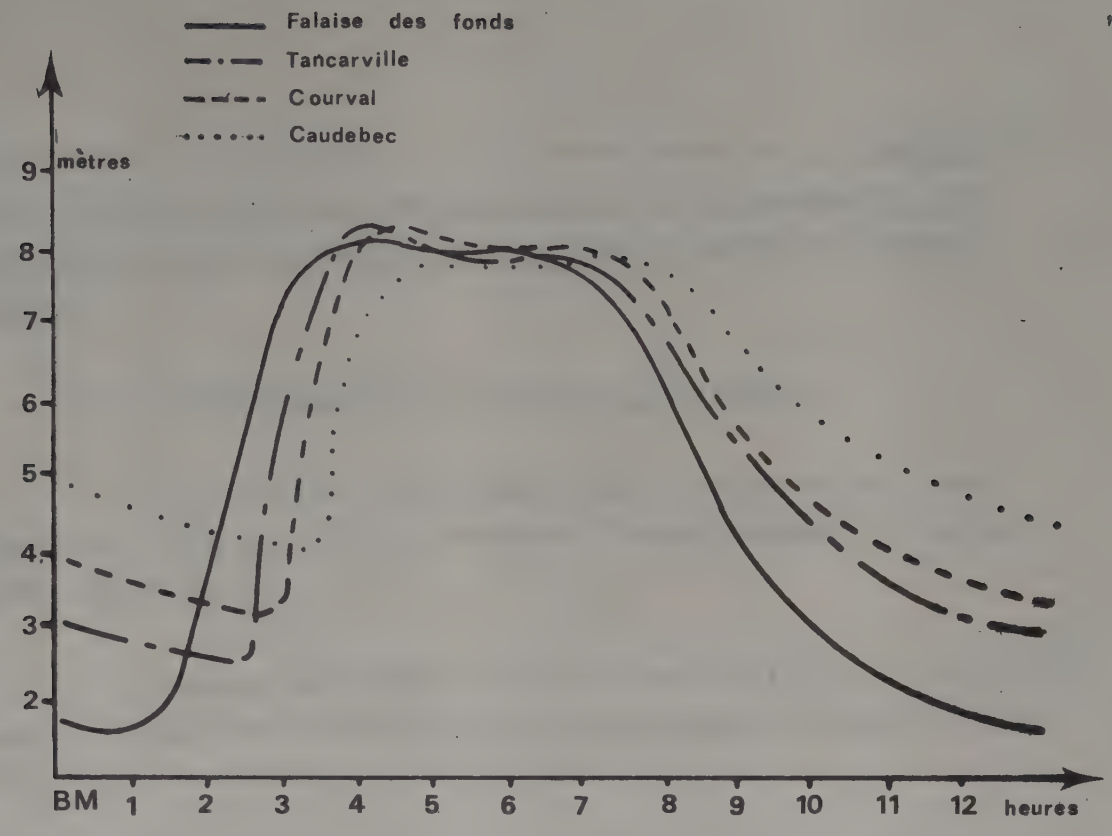
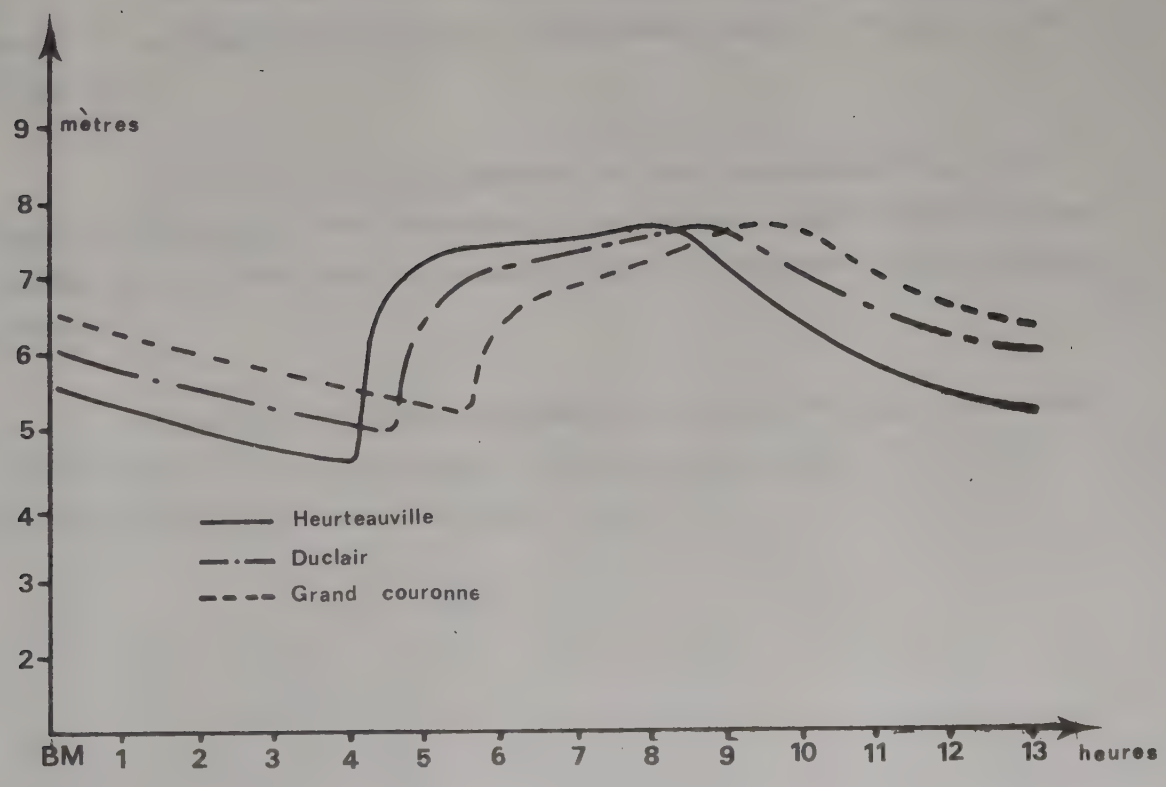


Fig.20 : Evolution de la courbe de marée entre Le Havre et Rouen Cœf. 70 d'après J.F. Le Floch 1961. pl. VI 1 a pl. VI 4



des lignes de déferlement, nous avons admis que le mascaret joue un rôle très important dans la mise en suspension des sables (50-100 microns) et des pelites en amont de Tancarville.

IX-5 - Circulation de l'eau dans l'estuaire

La circulation des eaux dans l'estuaire est très complexe. Elle peut être présentée schématiquement de la manière suivante :

Lorsque le jusant est bien établi (fig. 21) les eaux fluviales ont tendance à être légèrement déviées vers le N.W.

Le flot apparaît tout d'abord dans la région havraise, avant que le jusant soit achevé. Il finit par prendre une direction N.S. (courant d'Antifer -fig. 22).

Le courant du Calvados apparaît environ trois heures après le courant d'Antifer par pivotement du N.W. vers le S.W. (fig. 23).

Il résulte de l'ensemble de ces phénomènes que les eaux troubles qui sont évacuées à la fin du jusant circulent au-dessus de la fosse de la Carosse, selon un circuit plus ou moins fermé.

Au flot, et après décantation des particules les plus grossières ou les plus denses, la trame organique, les micas, les poudres et les argiles, sont recyclés.

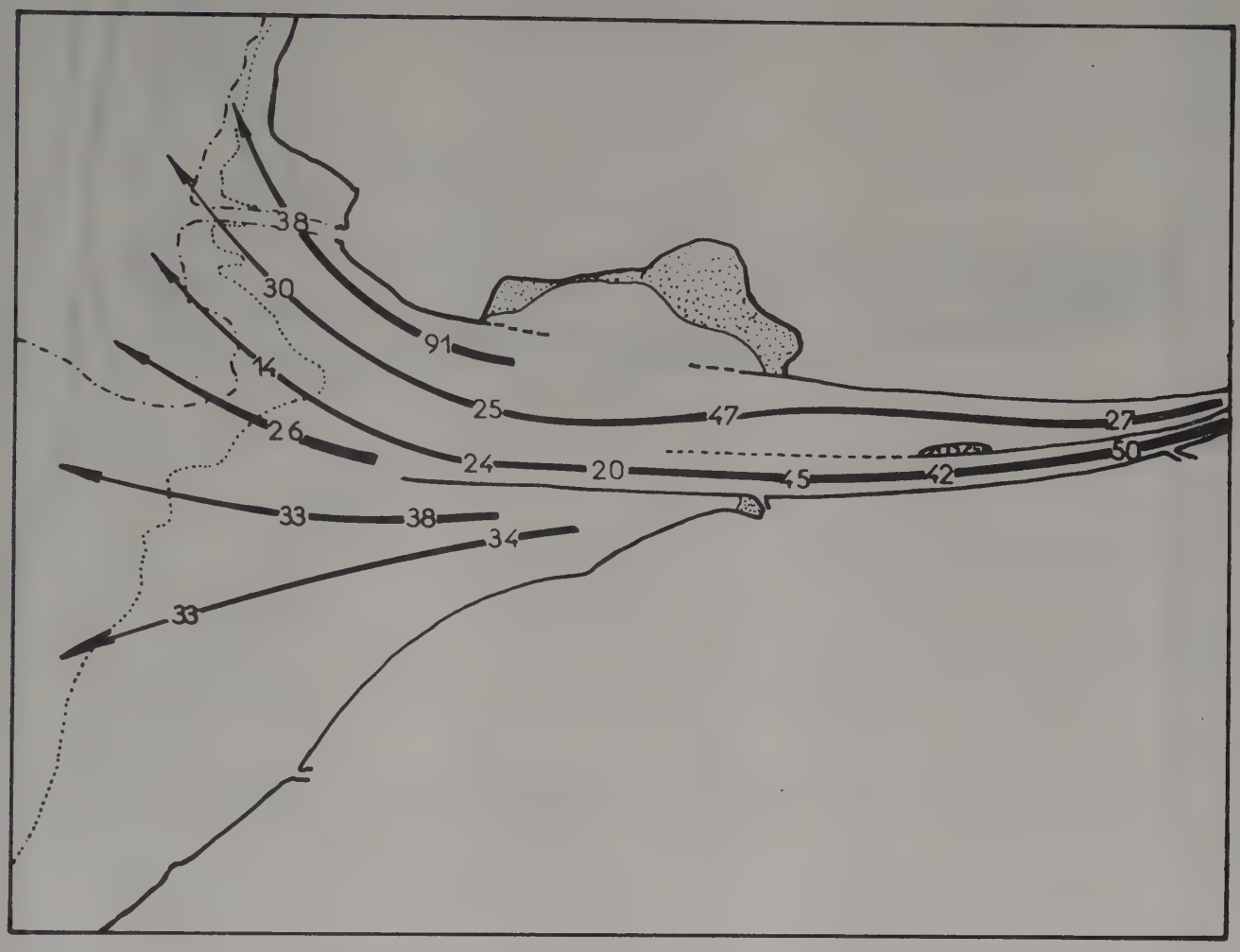


Fig. 21. Courant de JUSANT

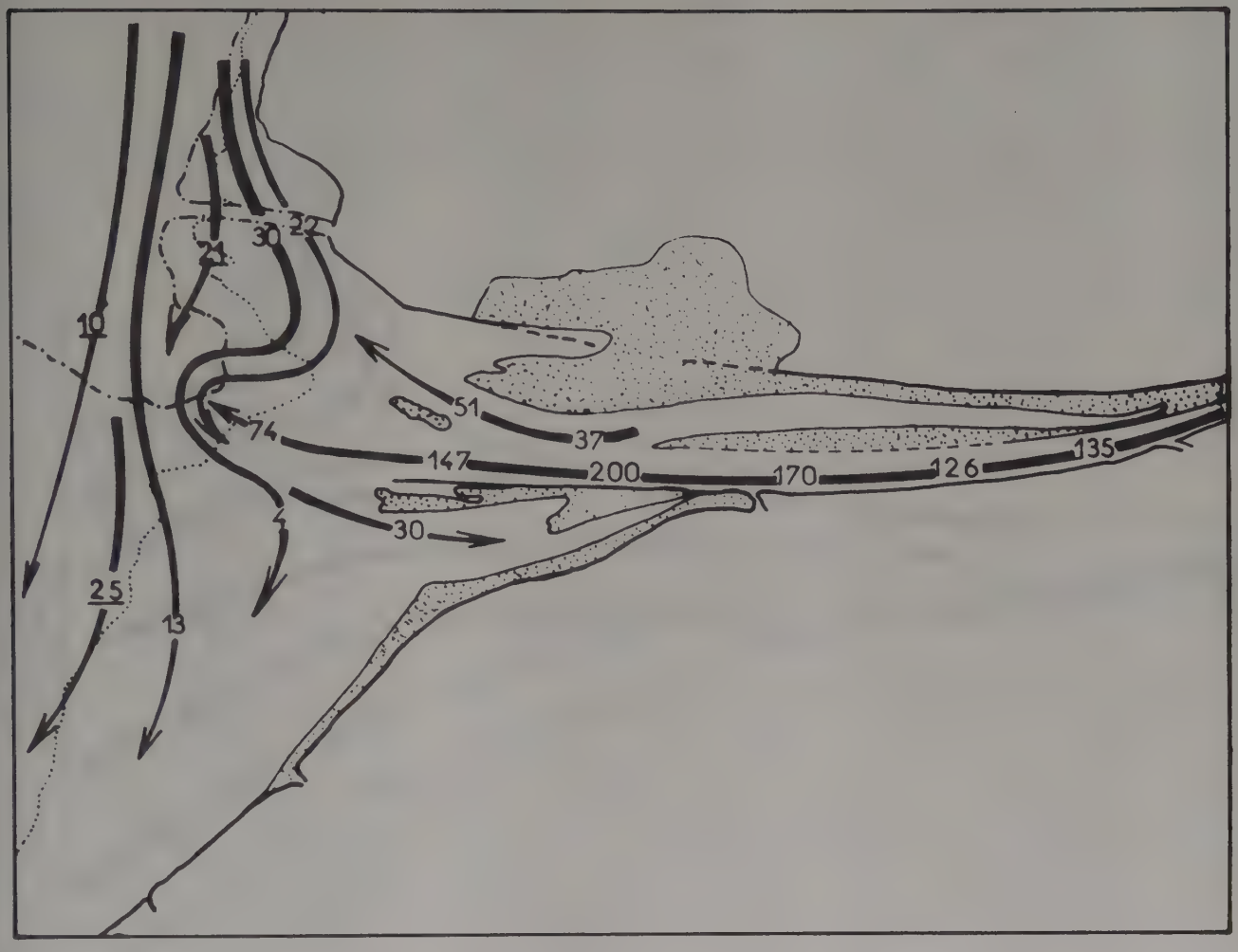


Fig. 22 . Courant d ' ANTIFER

Courant traversier venant du Nord

Premier flot

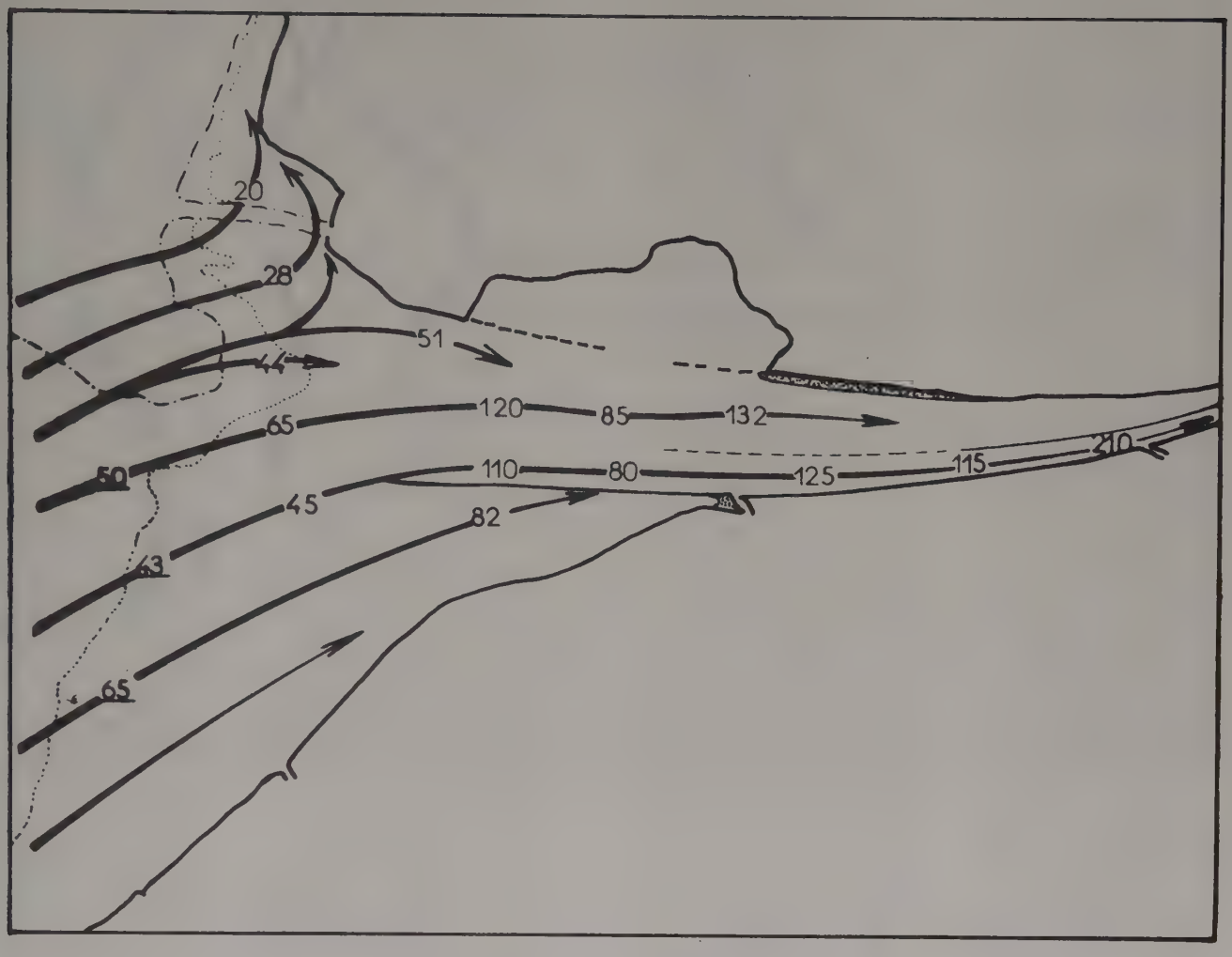


Fig.23. Courant du Calvados

Second flot

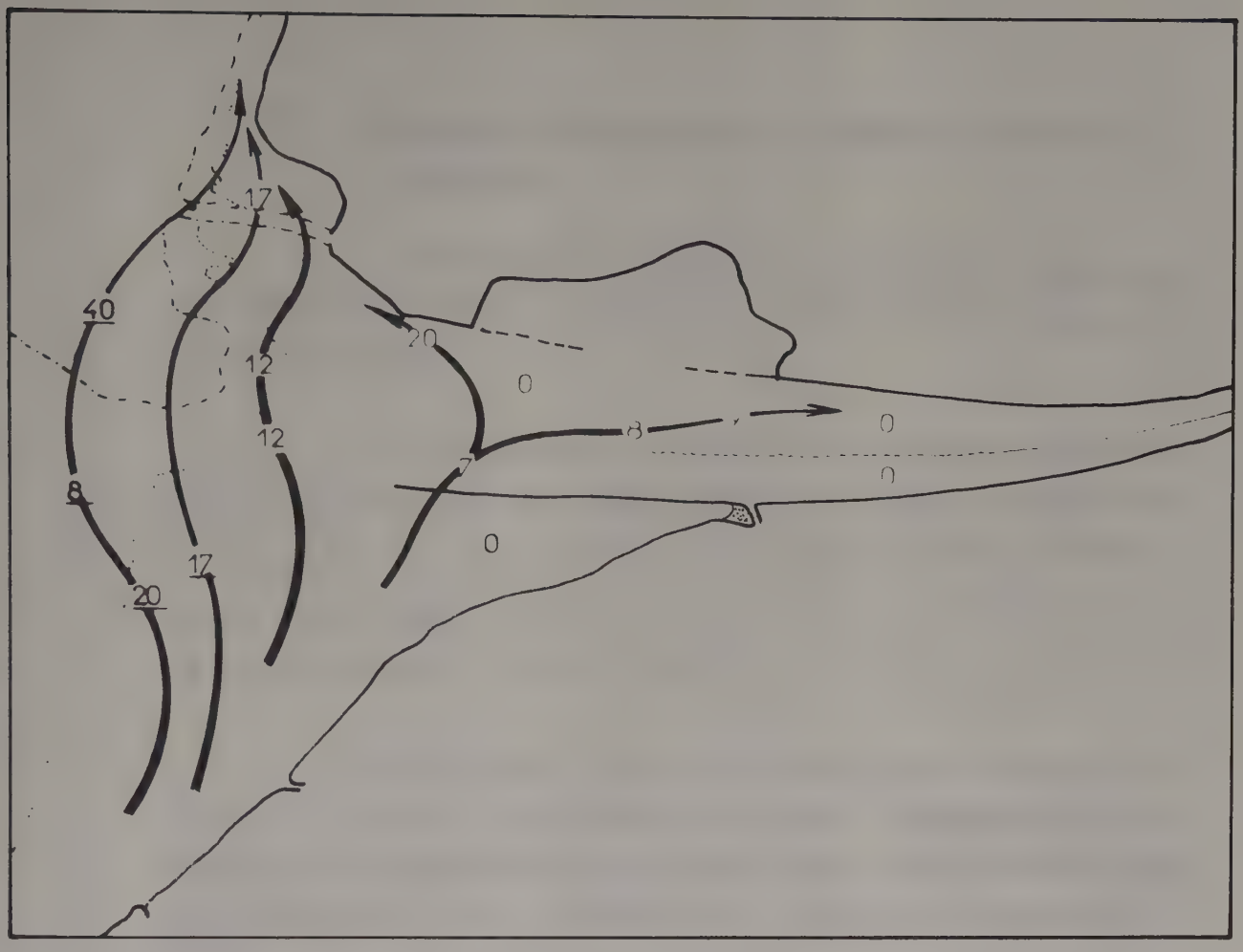


Fig 24 Courant VERHAULE

Courant traversier venant du Sud

Troisième flot

IX-6 - Dissymétrie des courants de marée à l'entrée de l'estuaire

La dissymétrie des courants est d'autant plus accusée que le coefficient de marée est élevé et que le débit du fleuve est faible.

Par débit moyen, on observe que le flot atteint une vitesse maximale qui est supérieure à la vitesse maximale de jusant (fig. 25). Ceci permet d'expliquer qu'entre Honfleur et la Risle, les particules dont la taille est supérieure à 125 ou 160 microns, ont, en de nombreux points, une résultante de déplacement, qui est dirigée vers l'amont (fig. 40).

Le calibrage du chenal de Navigation a augmenté au niveau de la Risle l'importance du jusant. L'ensemble de ces trajectoires compose donc un circuit fermé pour les particules qui se déplacent par roulement sous l'effet des courants de marée.

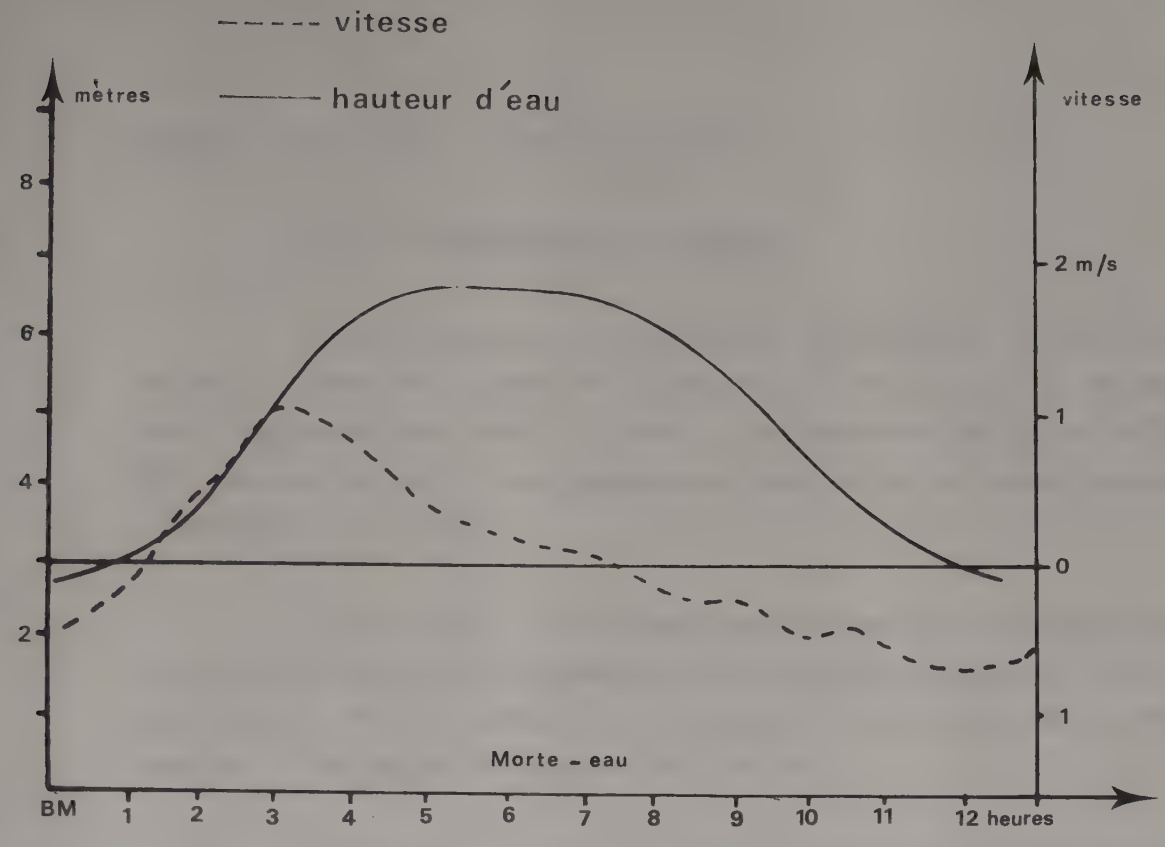
X - ELABORATION DES SUSPENSIONS DANS LA SEINE ET DANS SON ESTUAIRE

X-1 - Suspensions de la Seine fluviale

Nous ne considérons ici que les prélèvements qui ont été faits en amont de la limite de pénétration de la marée mécanique. Cette limite se situe à Poses.

Des prélèvements ont été faits à trois stations, du mois de février 1963 à celui de février 1964, à Poses, à Port-Mort et à Chatou (fig. 26).

Nous prendrons l'exemple de la station de Chatou qui



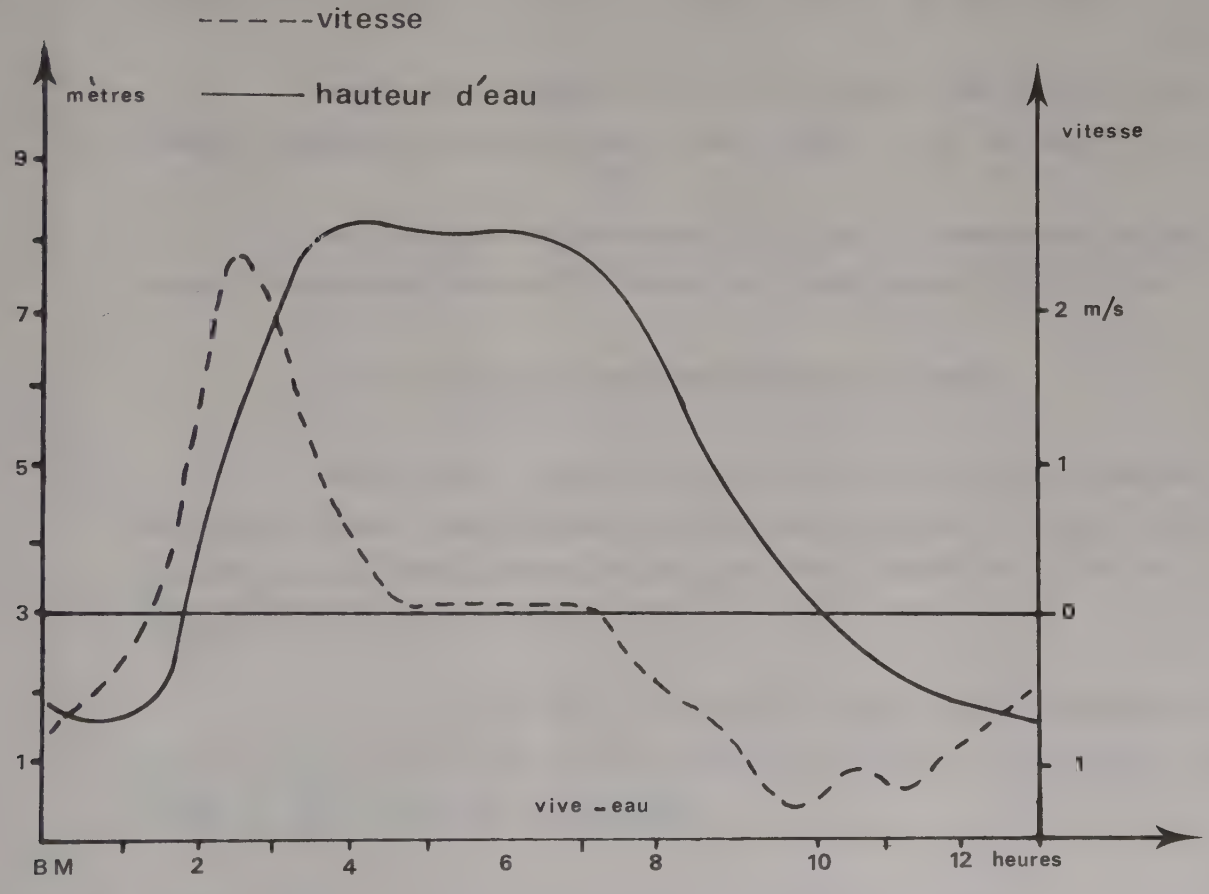


Fig. 25. Relation entre la courbe de marée et la vitesse des courants
d'après J.F. Le Floch. 1961, Falaise des fonds Pl. VII 4

semble être la plus caractéristique.

X-1-1 - Turbidité à Chatou

Nous n'avons pas pu établir de relation bien précise entre le débit du fleuve et la turbidité des eaux. Si on examine les résultats dans le détail, on constate qu'à une valeur déterminée du débit, correspondent toutes les valeurs possibles inférieures à 80 mg/l.

Par contre, les valeurs maximales correspondent toujours à une période d'augmentation du débit du fleuve (fig. 27). Les valeurs de la turbidité en surface et pour une même période, varient d'un point à l'autre de 1 à 10.

Pendant une longue période d'étiage la turbidité moyenne varie de 3 à 37 mg/l. pour un débit de 180 m^3/s.

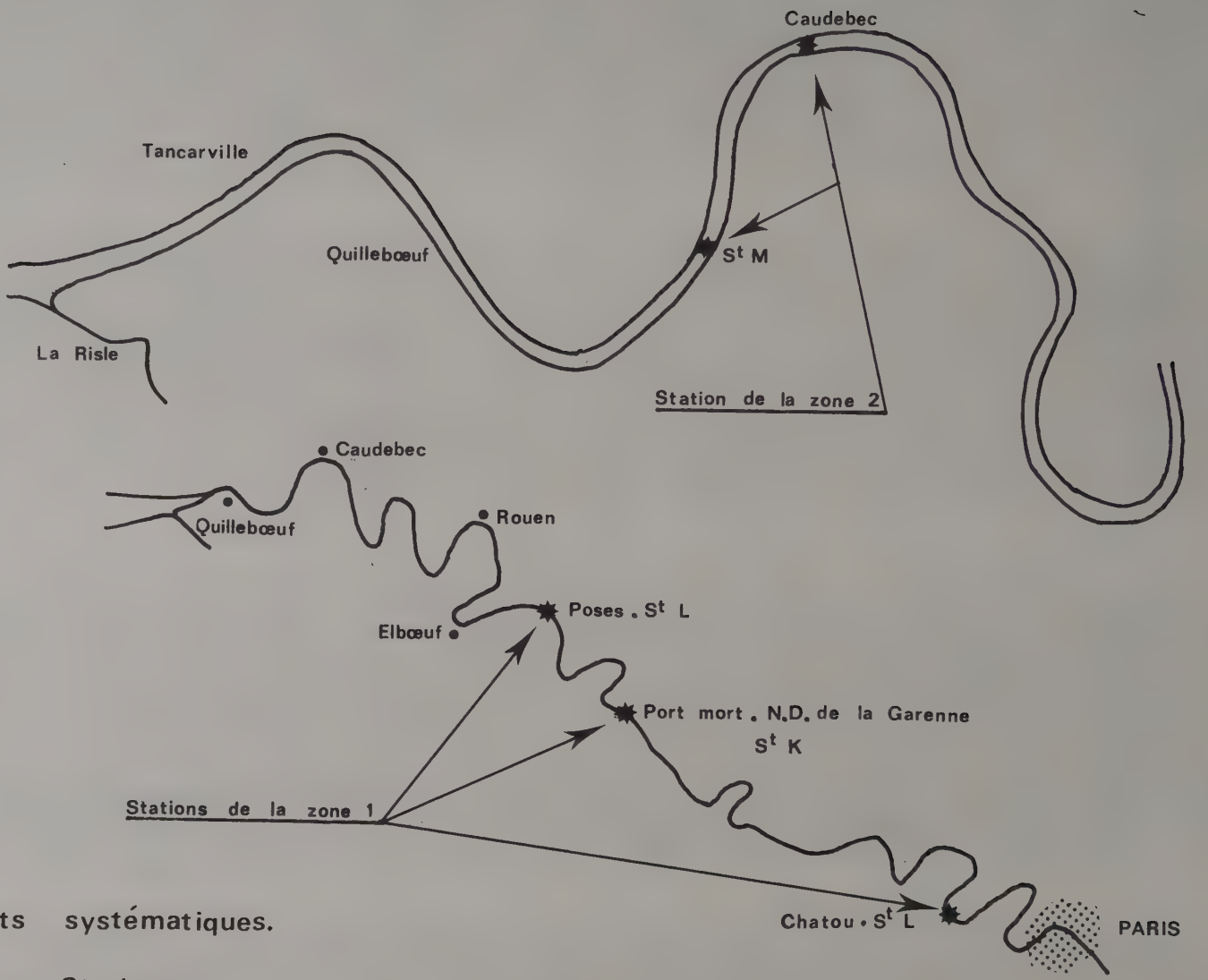
Pendant une période de débit moyen (300 m^3/s.) les valeurs moyennes obtenues oscillent entre 23 et 104 mg/l.

Les valeurs supérieures à 50 mg/l. commencent à devenir fréquentes lorsque le débit est supérieur à 300 m^3/s.

X-1-2 - Nature des suspensions de Poses

Poses étant situé à la limite atteinte par la marée mécanique, nous considérons que les suspensions que nous avons prélevées sont réellement celles qui sont apportées plus ou moins régulièrement par la Seine.

Au niveau du dernier barrage (Poses) ces suspensions sont caractérisées par une fraction inférieure à 50 microns qui forme de 85 à 97 % de l'ensemble.



Prélèvements systématiques.

Position des Stations.

Fig. 26

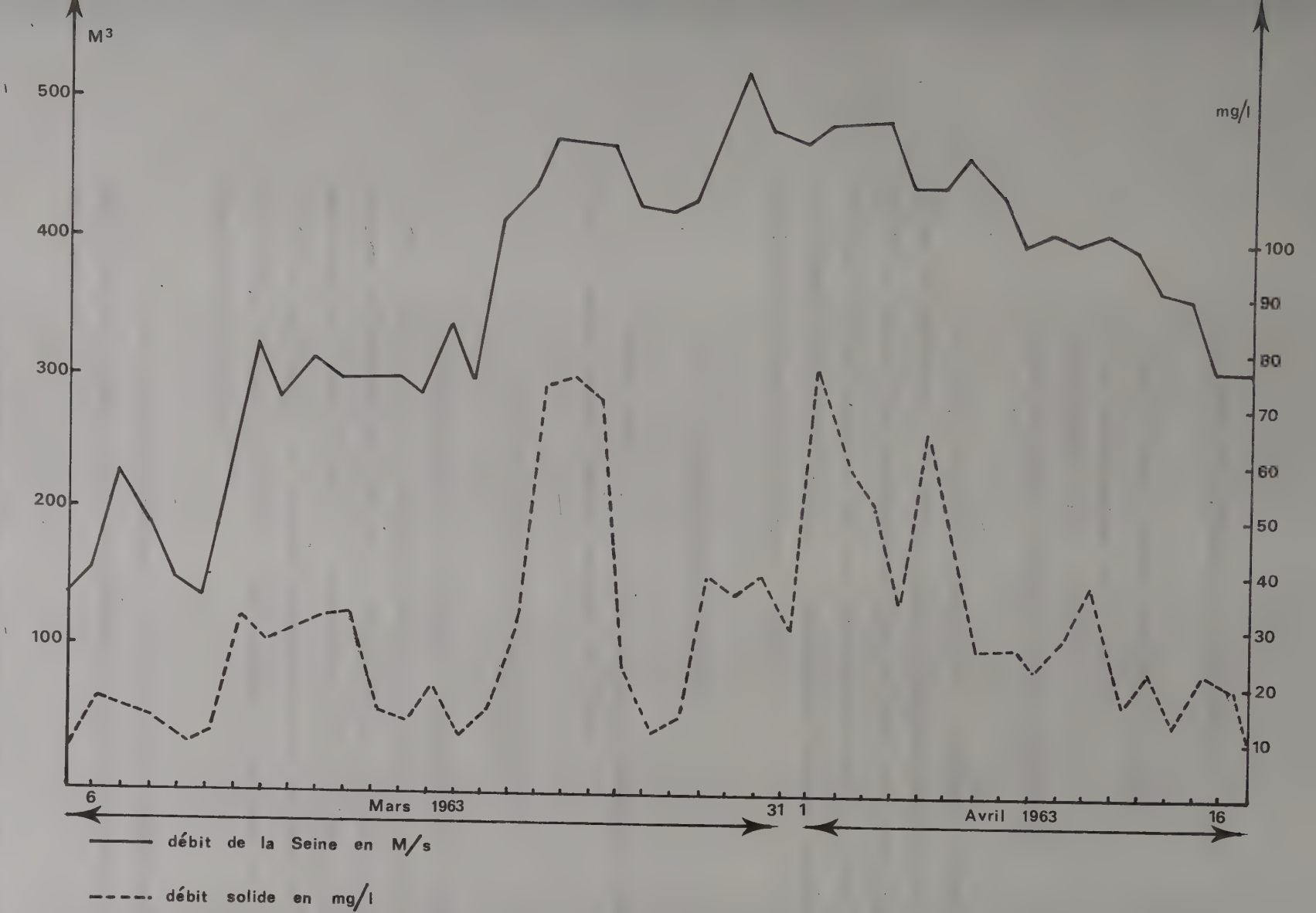


Fig. 27 . Prélèvements systématiques de Chatou

La fraction grossière contient :

- des fibres lignifiées (40 à 50 %),
- des carbonates (40 à 50 %),
- du quartz (6 à 7 %),
- des minéraux lourds (0,04 à 0,08 %).

Le grain moyen du quartz est toujours situé entre 50 et 80 microns. Le cortège minéralogique contient à peu près 90 % de micas. Les minéraux en grains ont une forme tabulaire ou une faible densité. Le cortège caractéristique des apports du fleuve serait le suivant : hornblende verte, sphène, grenat, épidote, tourmaline, anatase, zircon.

X-1-3 - Suspensions à Rouen

Rouen subit l'effet de la marée mécanique, mais ne reçoit aucun apport marin venant de l'aval.

X-1-3-1 - Turbidité et courants

En vives-eaux, et lorsque le débit de la Seine est faible (225 m3/s.) le marnage est de 2,85 m. La vitesse du courant n'excède pas 100 cm/s. en surface. La turbidité maximale sur le fond (77 mg/l.) correspond à la renverse du courant. A la fin du flot, les turbidités en surface et sur le fond sont les mêmes et appartiennent à des masses d'eau qui ont été homogénéisées en aval.

La turbidité moyenne (40 mg/l.) est supérieure à celle qu'on observe dans les mêmes conditions à Poses et à Port-Mort.

Le passage du flot au jusant étant plus progressif que le passage inverse, on peut supposer que les vases mises

en suspension en aval de Rouen se déposent plus en amont.

X-1-3-2 - Nature des suspensions à Rouen

Les suspensions de Rouen sont exclusivement d'origine fluviatile et leur composition est identique à celle des prélèvements systématiques de Poses.

Avec les moyens d'analyse dont nous avons disposé nous n'avons pu déceler à ce niveau aucune influence marine.

X-2 - Suspensions de la Seine fluvio-marine

La Seine fluvio-marine est comprise entre Vieux-Port en aval et Biessard en amont. Cette partie du cours de la Seine est caractérisée par une sédimentation marine qui est très lente.

Dans cet intervalle la dissymétrie des courants de flot et de jusant ne semble pas être suffisante pour déplacer vers l'amont les particules de quartz dont la taille est comprise entre 100 et 200 microns.

Pour le déplacement vers l'amont des "suspensions temporaires" nous préférons faire appel au mascaret dont nous reparlerons.

Le déplacement des "suspensions permanentes" doit être considéré comme un phénomène tout à fait différent. Les flocons, dont la densité est très proche de celle de l'eau, sont évacués selon la résultante de l'écoulement.

X-2-1 - Suspensions de Caudebec

Au niveau de Caudebec, la marée à une influence

considérable sur la distribution des suspensions.

Des prélèvements journaliers ont été faits en surface entre le 6 février et le 7 mai 1963. Une seconde série a débuté le 5 novembre 1963 et s'est achevée le 6 avril 1964.

X-2-1-1 - Turbidité, coefficient de marée et débit fluvial

L'analyse de nombreux graphiques semblables à celui de la figure 28 nous a permis de mettre en évidence les phénomènes suivants :

- en période d'étiage (250 m3/s.) la mise en suspension est très importante. Si le coefficient est élevé (100-110) la turbidité maximale atteint 625 mg/litre. Si le coefficient est faible (40-50) la turbidité maximale n'est que de 190 mg/l.,

- en période de crue, l'influence de la marée est plus faible et la concentration des suspensions moins élevée.

Débit	Coefficient	Turbidité maximale
175 m3/s.	100	625 mg/l.
425 m3/s.	100	450 mg/l.
800 m3/s.	100	200 mg/l.

Dans tous les cas ces valeurs sont de 3 à 8 fois plus élevées qu'à Rouen.

X-2-1-2 - Influence du mascaret sur la mise en suspension

L'ensemble des phénomènes que nous venons de décrire

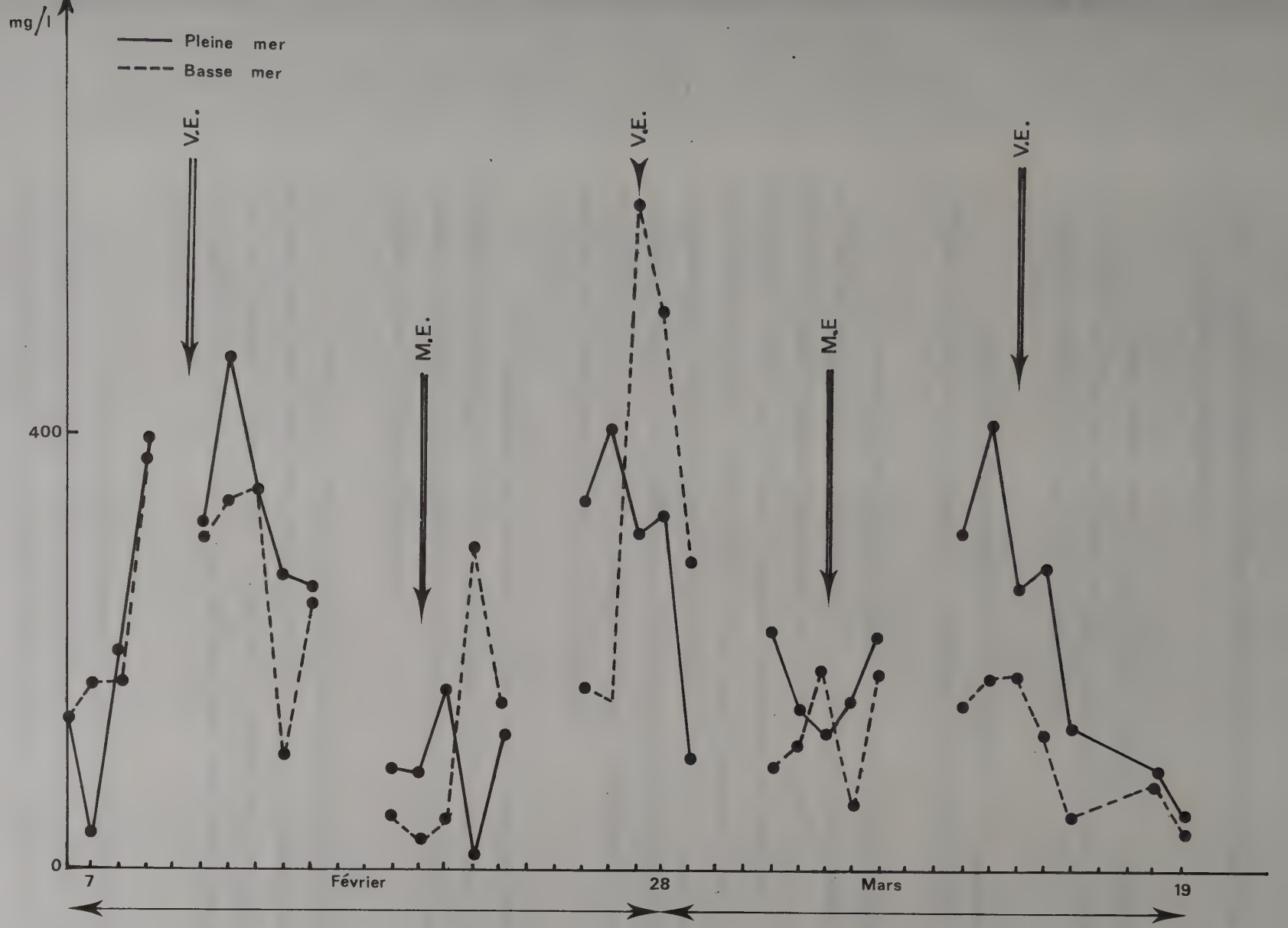


Fig.28 . Caudebec Février à Mai 1963 . mesures systématiques de débit solide (extrait)

semble pouvoir aisément être interprété si on considère le cas extrême du mascaret.

Nous avons choisi les conditions du 16 octobre 1962. Le débit du fleuve est très faible (125 m3/s.) et le coefficient de marée est très élevé (109-113).

Depuis l'appontement du marégraphe de Caudebec nous avons observé attentivement le passage du mascaret (fig. 29).

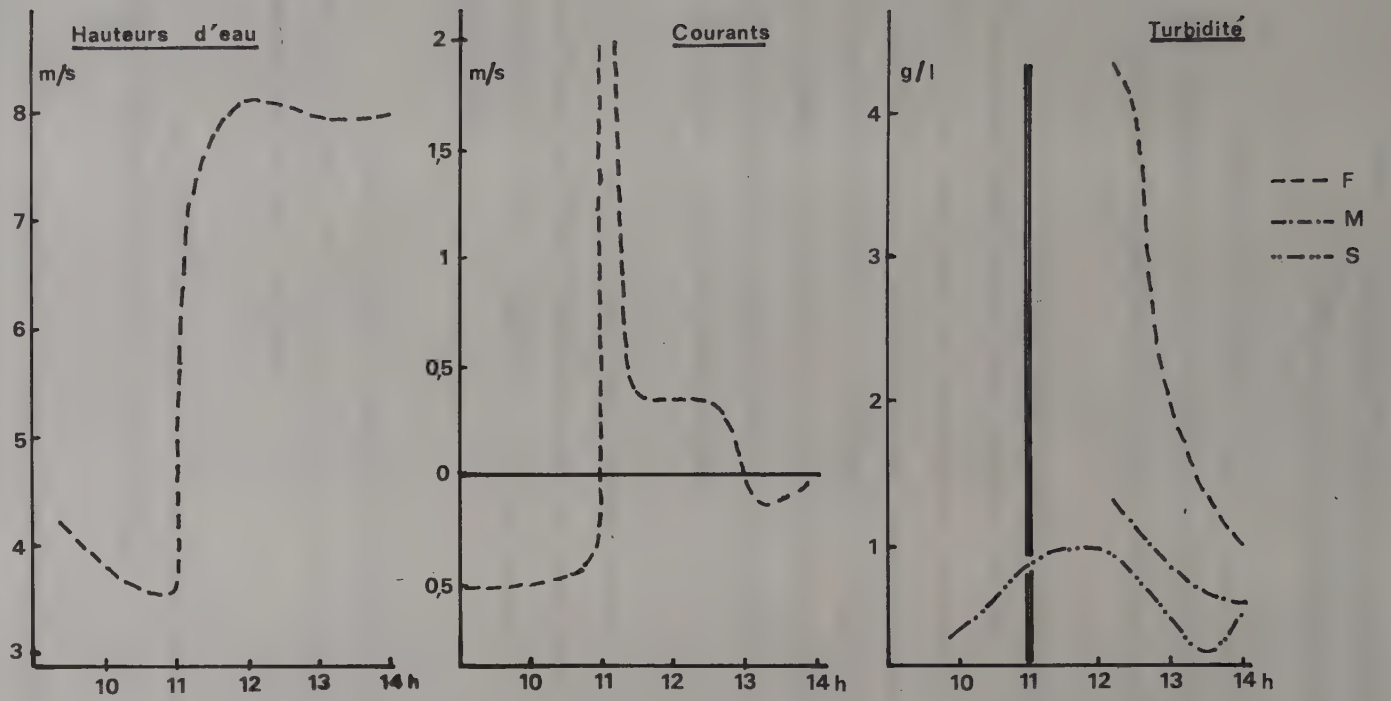
Le raidissement de l'onde est tel que la pleine mer s'établit en moins de 60 minutes. Le mascaret se traduit par une élévation brutale du niveau de l'eau et par des courants violents, dont la vitesse dépasse, pendant un instant, 2 m/s. La turbulence est très grande et on peut supposer que les composantes verticales sont importantes car la remise en suspension à partir du fond permet d'atteindre des turbidités supérieures à 4 g/l. Cette suspension est sableuse et sa décantation est vraisemblablement très rapide.

Le mascaret se produit alors que l'eau est douce (chlorinité 50 mg/l.). Ces suspensions sont élaborées localement à partir d'un matériel qui est aussi bien d'origine fluviale que d'origine marine.

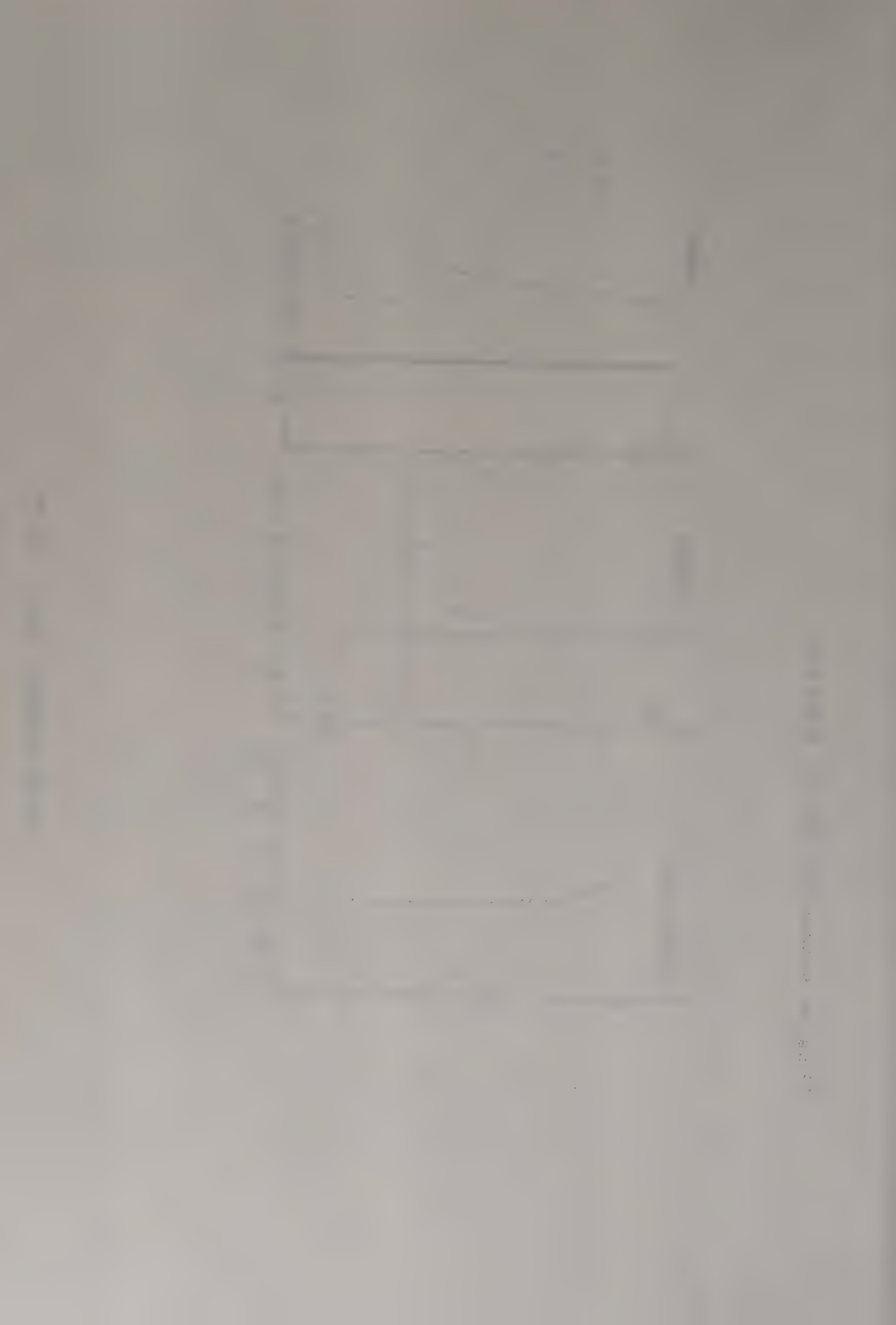
Lorsque le débit du fleuve est plus élevé (430 m3/s.) le mascaret est beaucoup moins prononcé. Les vitesses en surface atteignent à peu près 1 m/s. et la turbidité maximale sur le fond est de 0,7 g/l., c'est-à-dire six fois inférieure à la précédente.

Il faut sans doute admettre que les mises en suspension importantes sont moins une fonction de la vitesse que des fluctuations de la turbulence (LUDERS et al. - 1961 - p. 36).

Mise en suspension par le Mascaret.



Fig, 29 . Caudebec . 16.10.62 Cœff. 116



X-2-2 - Mécanisme de déplacement des particules dans la Seine fluvio-marine

L'analyse précise des courants et des suspensions entre Caudebec et Vieux-Port nous conduit à penser que dans la Seine fluvio-marine existent deux mouvements opposés :

- les suspensions temporaires qui sont sableuses se déposent très vite. Les grains de 80 à 125 microns sont détachés du fond par le passage du mascaret et peuvent atteindre la surface. Le mascaret est toujours suivi immédiatement d'un courant de flot qui déplace les sables fins vers l'amont. Cette forme de transport ne se produit que lorsque le coefficient de marée est supérieur à 70, mais l'effet se fait toujours sentir dans le même sens,

- les suspensions permanentes qui sont maintenues en surface par une trame organique ont une résultante de transport qui est à plus ou moins longue échéance, dirigée vers l'aval.

La Seine fluvio-marine peut donc être considérée comme une zone de transition qui établit le passage entre l'estuaire et la rivière.

La fraction la plus fine des sables marins (100 microns) remonte en direction de Rouen.

La fraction la plus fine des suspensions fluviales descend en direction du Havre.

Il existe probablement des particules de taille intermédiaire qui sont soumises tantôt à un mécanisme, tantôt à l'autre, et qui peuvent être indifféremment d'origine continentale ou d'origine marine.

X-3 - Suspensions de l'estuaire de la Seine

X-3-1 - Suspensions à Quilleboeuf

Les mécanismes d'élaboration et de transport des suspensions sont les mêmes qu'à Caudebec, mais les chlorinités qui sont 2 à 10 fois plus élevées suivant le coefficient de marée et le débit du fleuve indiquent que les apports marins sont plus importants.

Le mascaret peut se produire, même lorsque le débit du fleuve est important (425 m3/s. le 27 mars 1963) et la mise en suspension à partir du fond peut créer des turbidités maximales de 5 à 7 g/l.

Quilleboeuf peut être considéré comme la limite de pénétration directe des suspensions marines. On peut constater que le transport vers l'amont des suspensions temporaires est d'autant plus important et plus fréquent que l'on est plus en aval.

X-3-2 - Suspensions à Tancarville

Tancarville peut être considéré comme la limite inférieure atteinte par les eaux du fleuve à la fin du jusant. Pour les débits variant de 175 à 425 m3/s. on observe à la fin du jusant un très bref passage d'eaux dont la chlorinité (40 à 50 mg/l.) est aussi faible qu'à Poses. On peut donc considérer que par débit moyen, les apports directs du fleuve peuvent atteindre Tancarville.

En période d'étiage la chlorinité est élevée par fort coefficient (10 g/l.) et très faible par faible coefficient (1 g/l.).

Les suspensions ont une double distribution :

- en mortes-eaux, on trouve deux maximums. Le premier qui se situe à la fin du jusant correspond à l'arrivée des eaux fluviales. Le second qui se produit au début du flot correspond au retour de la même masse trouble. Ce phénomène a été très bien décrit en Hollande (HANSEN K - 1954 - p. 78),

- en vives-eaux, apparaît un maximum qui est situé au moment de la renverse. Il s'agit d'une mise en suspension locale à partir du fond.

X-3-3 - Suspensions dans le chenal de Navigation

Au niveau de l'estuaire les énergies mises en jeu sont très élevées et les courants, sous faible épaisseur d'eau, semblent capables de mettre en suspension, parfois pour un temps très bref, des particules siliceuses grossières qui ne sont pas liées entre elles par une trame organique et qui peuvent donc se déposer très vite.

Tout se passe comme si nous devions considérer l'étude des suspensions temporaires dans cette région du fleuve comme un prolongement du recyclage des sédiments grossiers dont nous avons déjà parlé.

A chaque instant les suspensions qui viennent de l'aval ou de l'amont, sont mêlées à celles qui sont d'origine locale, et il semble parfois dangereux de vouloir les distinguer, sans avoir recours à une analyse qualitative.

X-3-3-1 - Turbidité, vitesse et hauteur d'eau

Nous n'avons pas pu mettre en relation la turbidité

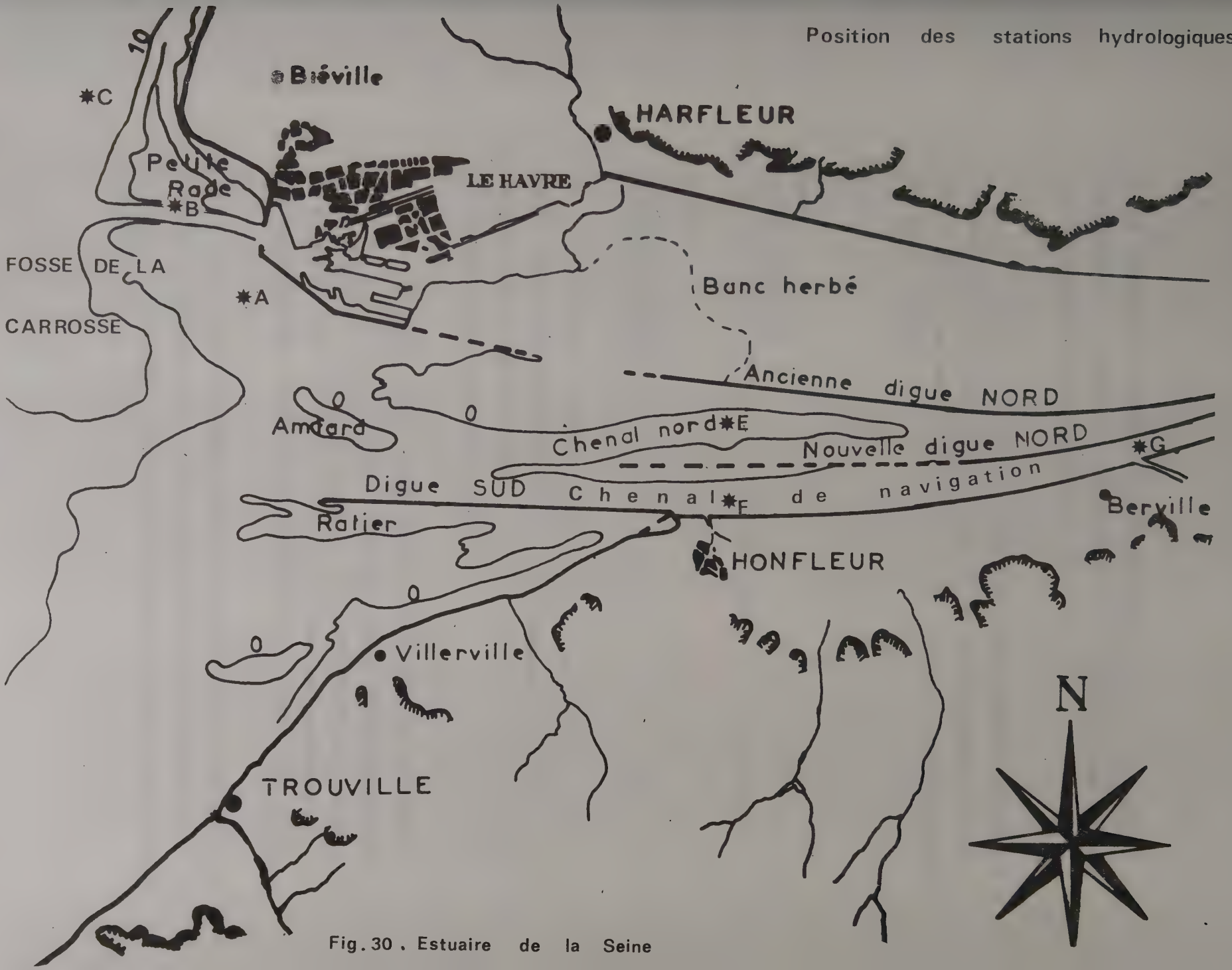


Fig. 30 . Estuaire de la Seine

et la vitesse du courant soit en surface soit sur le fond. (GERMANEAU J. - 1969 - p. 56). Ceci est surtout valable lorsque la hauteur d'eau est forte (7 à 10 m.).

Lorsque la hauteur d'eau est plus faible (4 à 7 m.) c'est-à-dire lorsque les fonds de +1 m. sont émergés, la relation que l'on peut établir entre la vitesse et la turbidité est plus précise.

	Station F	Station G
Jusant Vitesse maximale à proximité du fond	220 cm/s.	130 cm/s.
Jusant Turbidité maximale à proximité du fond	3,2 g/l.	2,2 g/l.

A notre avis l'augmentation de la turbidité et celle des vitesses résultent de l'abaissement du niveau de l'eau et de la réduction de la section, mais il n'existe pas de relation directe entre elles.

De nombreux auteurs se sont déjà heurtés aux mêmes difficultés d'interprétation. Dans des zones ouvertes aux houles du large on a pu remarquer que la mise en suspension sur les bordures est une fonction de l'étendue des surfaces qui sont découvertes à marée basse (GOULEAU D. - 1971 - p. 632).

La mise en suspension est due aux petits déferlements de bordure (GROVEL A.P. - 1970 - p. 237) ou bien comme nous avons pu le constater sur les côtes basses à des ruissellements lorsque la mer se retire.

X-3-3-2 - Déplacement des suspensions en vive-eau

Les sables fins sont mis en suspension par le flot (fig. 31) et sont vraisemblablement déplacés en partie vers l'amont comme nous l'avons vu à Caudebec.

A la suite du calibrage du chenal de Navigation, nous constatons que les vitesses sont plus élevées au jusant qu'au flot. Les suspensions qui sont évacuées vers l'aval sont plus concentrées (3 à 12 g/l. que celles qui sont, après la renverse, rabattues vers l'amont (1 à 2,5 g/l.). Elles sont en général très voisines des suspensions fluviales et sont rapidement évacuées en mer.

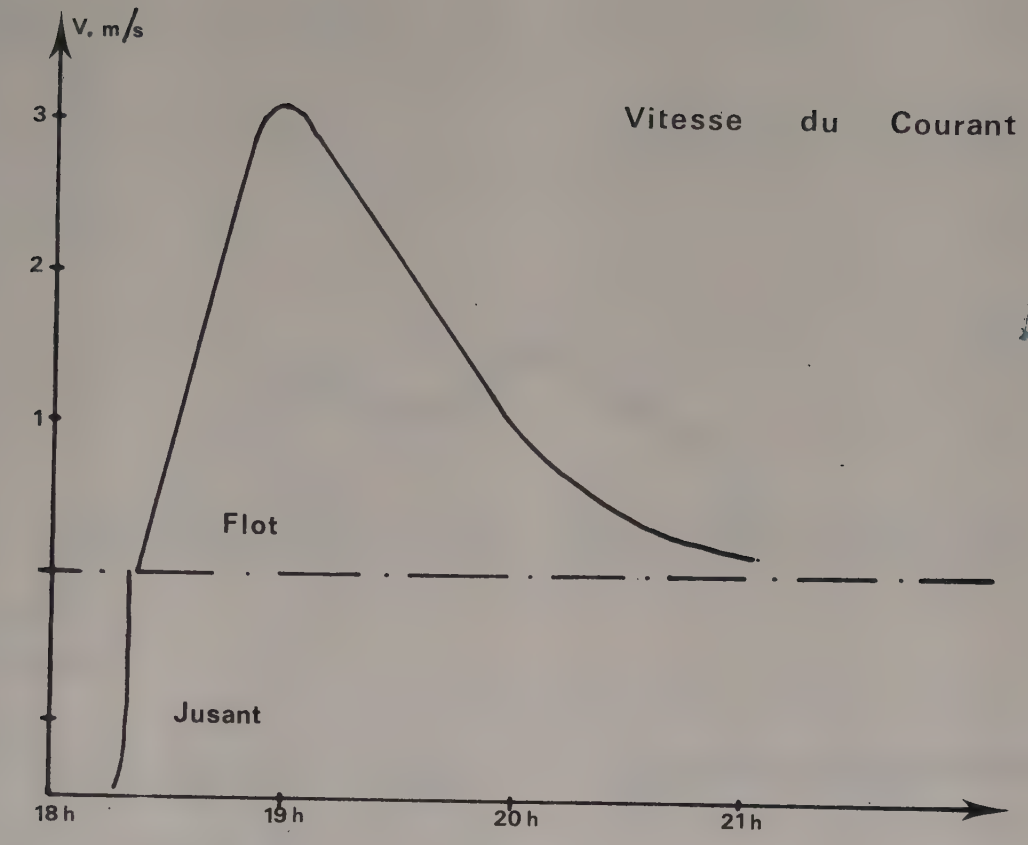
Au cours du cycle de marée nous assistons à deux phénomènes opposés :

- les suspensions temporaires sont déplacées vers l'amont par le flot,

- les suspensions permanentes et les sables du chenal sont déplacés vers l'aval pendant le jusant.

X-3-3-3 - Déplacement des suspensions en morte-eau

La remise en suspension lors du flot est extrêmement faible (fig. 32) et nous n'avons jamais prélevé de suspensions sableuses par faible coefficient. Nous pensons qu'en morte-eau les sables du chenal de Navigation restent immobiles. Seules les suspensions fluviales se déplacent.



Mise en suspension en Vive eau

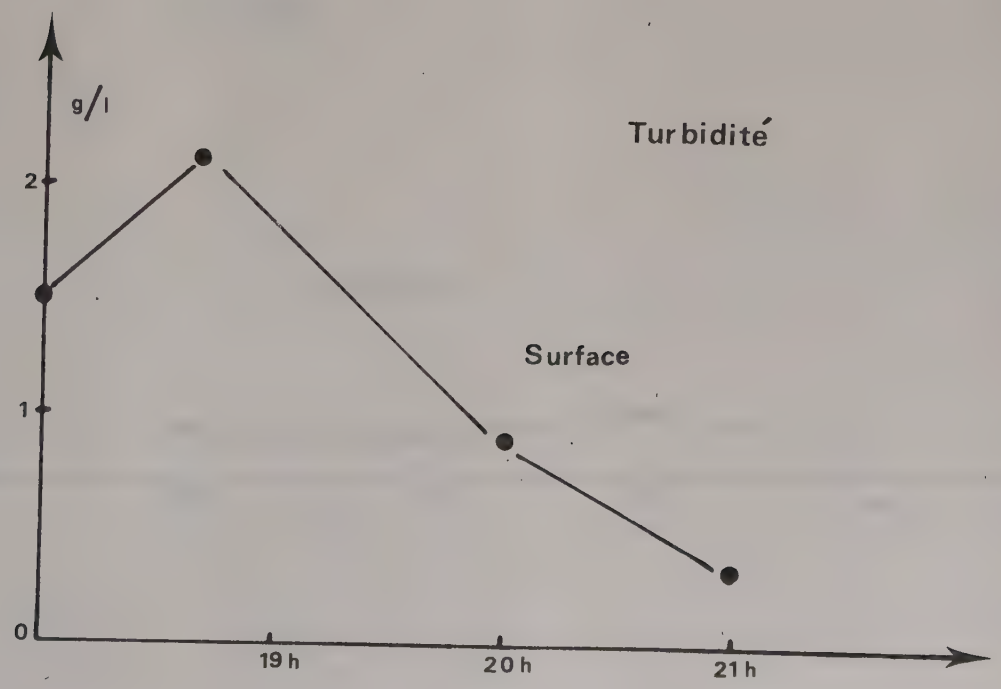
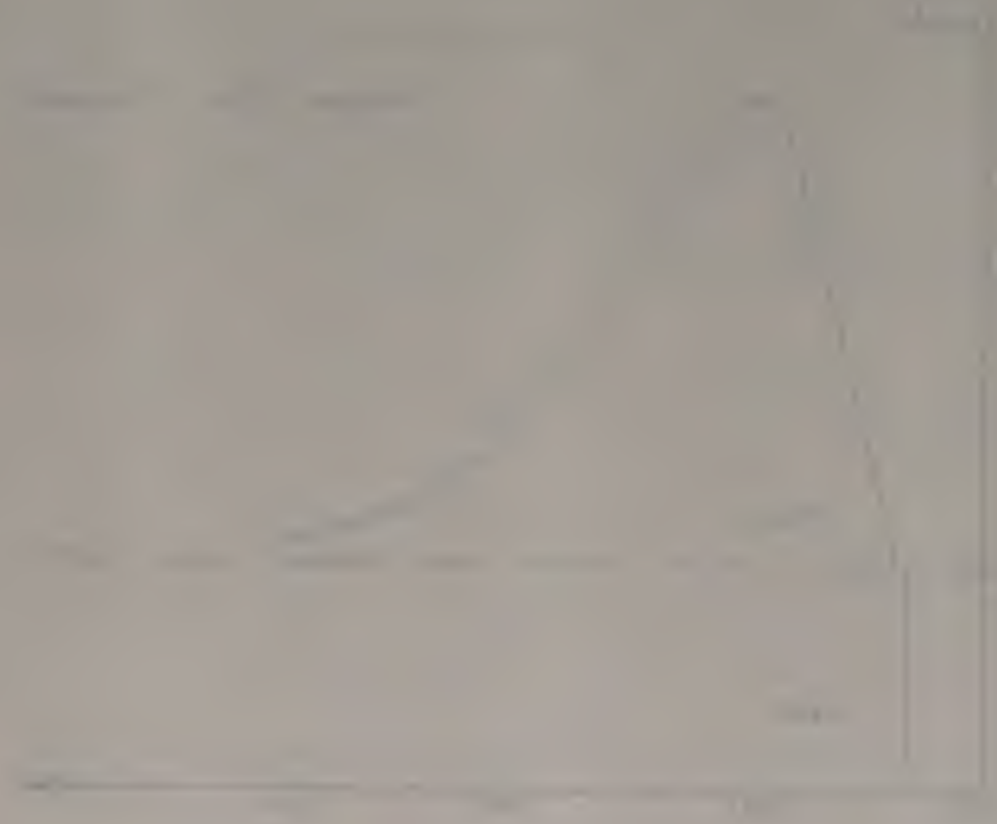
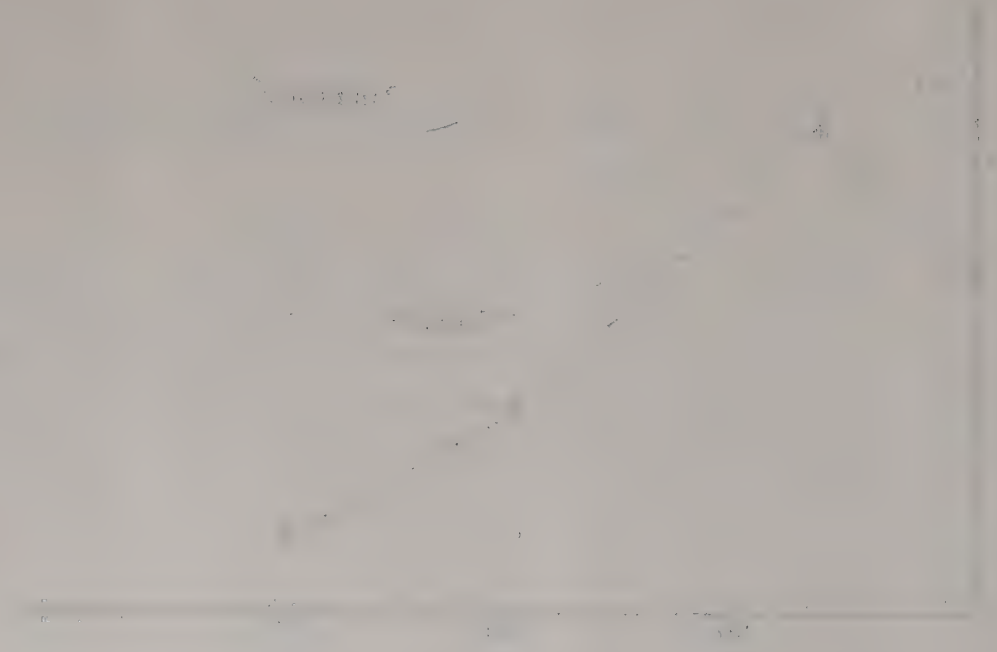
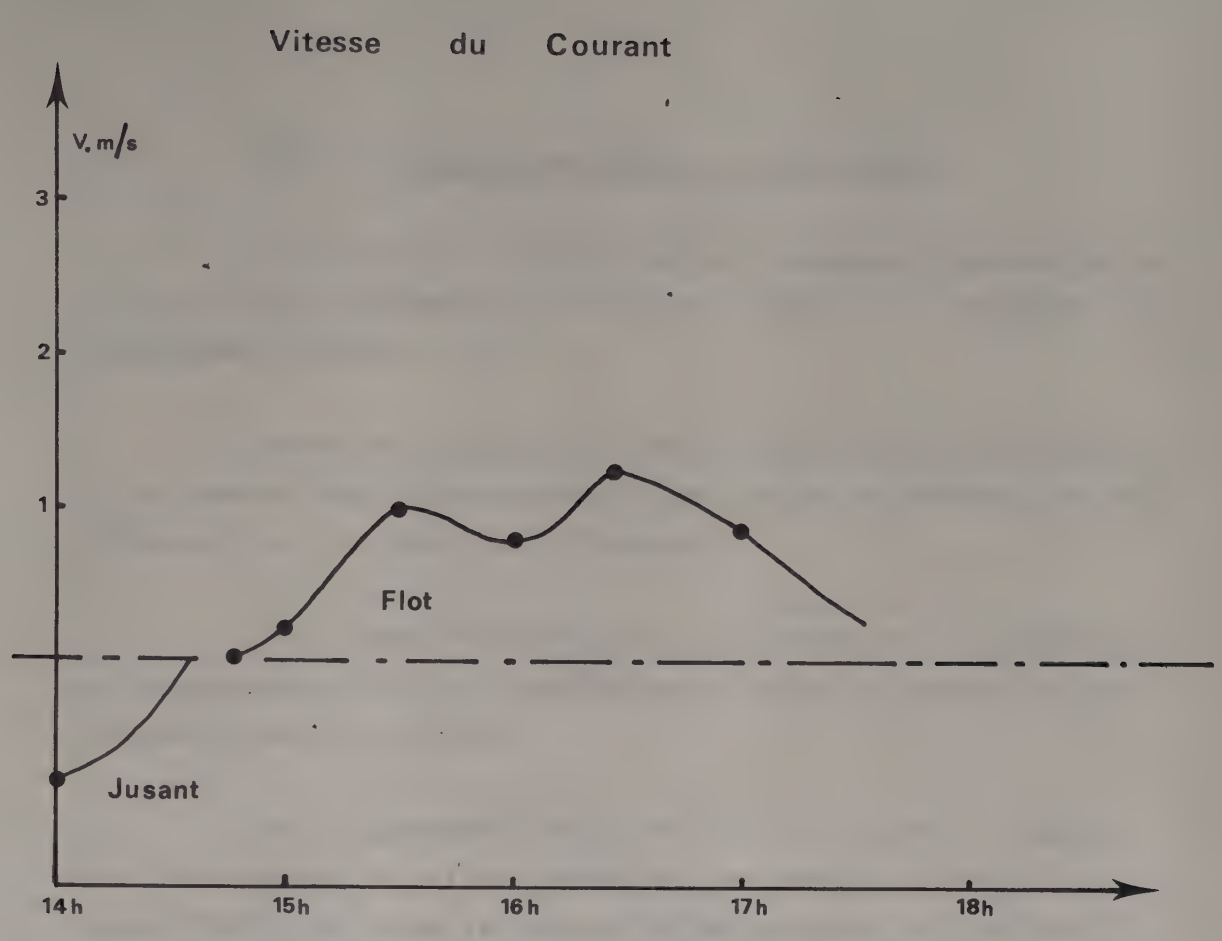


Fig. 31. Honfleur . Cœf. 109 · 114 . 13 Oct. 1962 . Station F







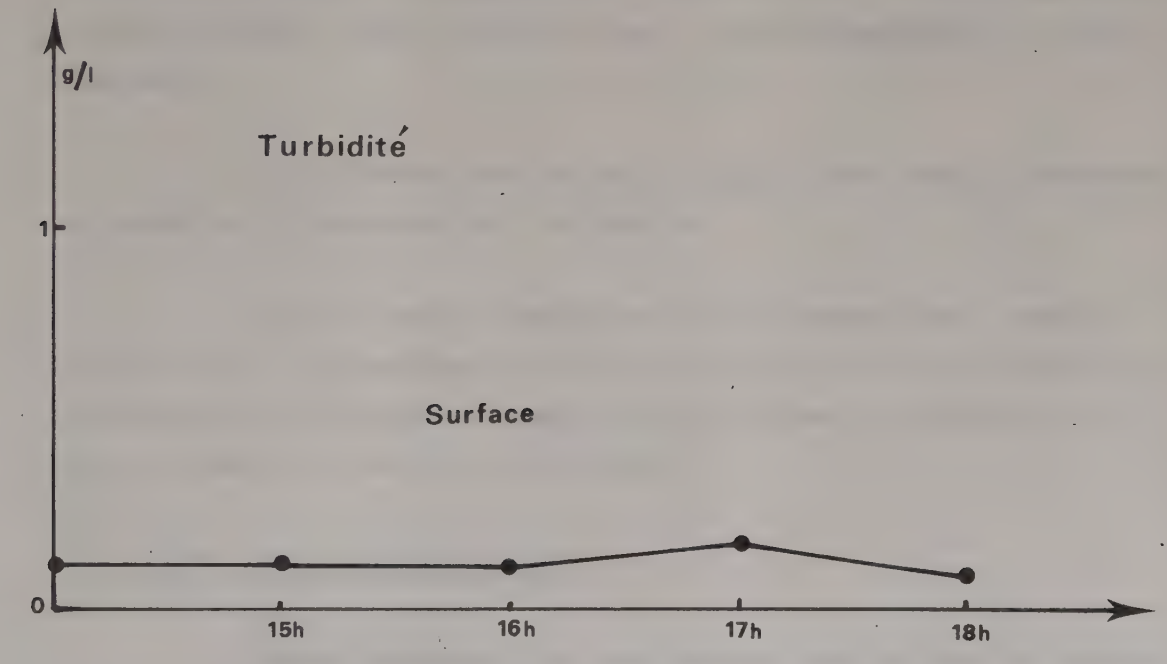


Fig.32. Honfleur . Cœf. 44-48 . 23 Oct. 1962 . Station F

X-3-4 - Suspensions dans le chenal Nord

En période de vives-eaux les vitesses à proximité du fond sont plus élevées au flot qu'au jusant et la renverse est extrêmement brutale.

Comme nous l'avons vu entre Tancarville et Caudebec il se produit une mise en suspension locale de sablons qui ont tendance à se déplacer vers l'amont.

En période de mortes-eaux, la renverse des courants est progressive et il ne semble pas y avoir de remise en suspension à partir du fond.

Les suspensions permanentes qui ont subi au large une décantation sélective importante empruntent d'abord le chenal Nord, car dans le chenal de Navigation, le flot est plus tardif. La chlorinité qui est élevée dès le début du flot (10 à 12 g/l.) indique bien que les eaux fluviales, après avoir effectué leur circuit en mer, sont mélangées à de l'eau de mer.

La turbidité maximale (0,8 g/l.) est bien inférieure à celle de l'ensemble de l'estuaire.

On peut donc considérer que le chenal Nord permet aux sables, aux sablons et aux pelites de la fin du jusant de regagner la rivière sans emprunter le chenal de Navigation, dans lequel le flot est plus tardif.

X-4 - Suspensions en mer

Trois campagnes ont été faites dans la région havraise aux stations A, B et C (fig. 30).

La première série de prélèvements a eu lieu au mois d'octobre 1962. Cette période est caractérisée par un prolongement assez exceptionnel de l'étiage. Entre le début du mois d'août et la fin du mois de novembre, le débit de la Seine a oscillé entre 120 et 250 m3/s.

La deuxième campagne a eu lieu au mois de mars 1963 pendant une période de débit moyen (425 à 530 m3/s.).

La troisième correspond à une crue de la Seine qui commence le 20 octobre et s'achève le 8 décembre. Pendant cette période le débit du fleuve est compris entre 600 et 800 m3/s.

X-4-1 - Courants et chlorinités

En dehors de l'estuaire nous avons déjà vu que les courants de marée sont pivotants. Pendant le flot on voit se succéder le courant d'Antifer, le courant du Calvados et le courant de Verhaule. Lorsque le coefficient de marée est élevé on observe trois maximums de vitesse qui correspondent à ces trois stades d'établissement du flot (fig. 33).

La répartition des chlorinités et des turbidités peut être représentée schématiquement par la figure 34. Les eaux troubles ont une chlorinité plus faible que les eaux claires.

X-4-2 - Débit solide d'étiage

En période d'étiage l'évacuation vers le large des suspensions permanentes semble assez lente.

Lorsque le coefficient de marée est faible on constate que les concentrations maximales sont voisines de celles qu'on trouve à Poses (20-40 mg/l.) et qu'elles ne varient pas

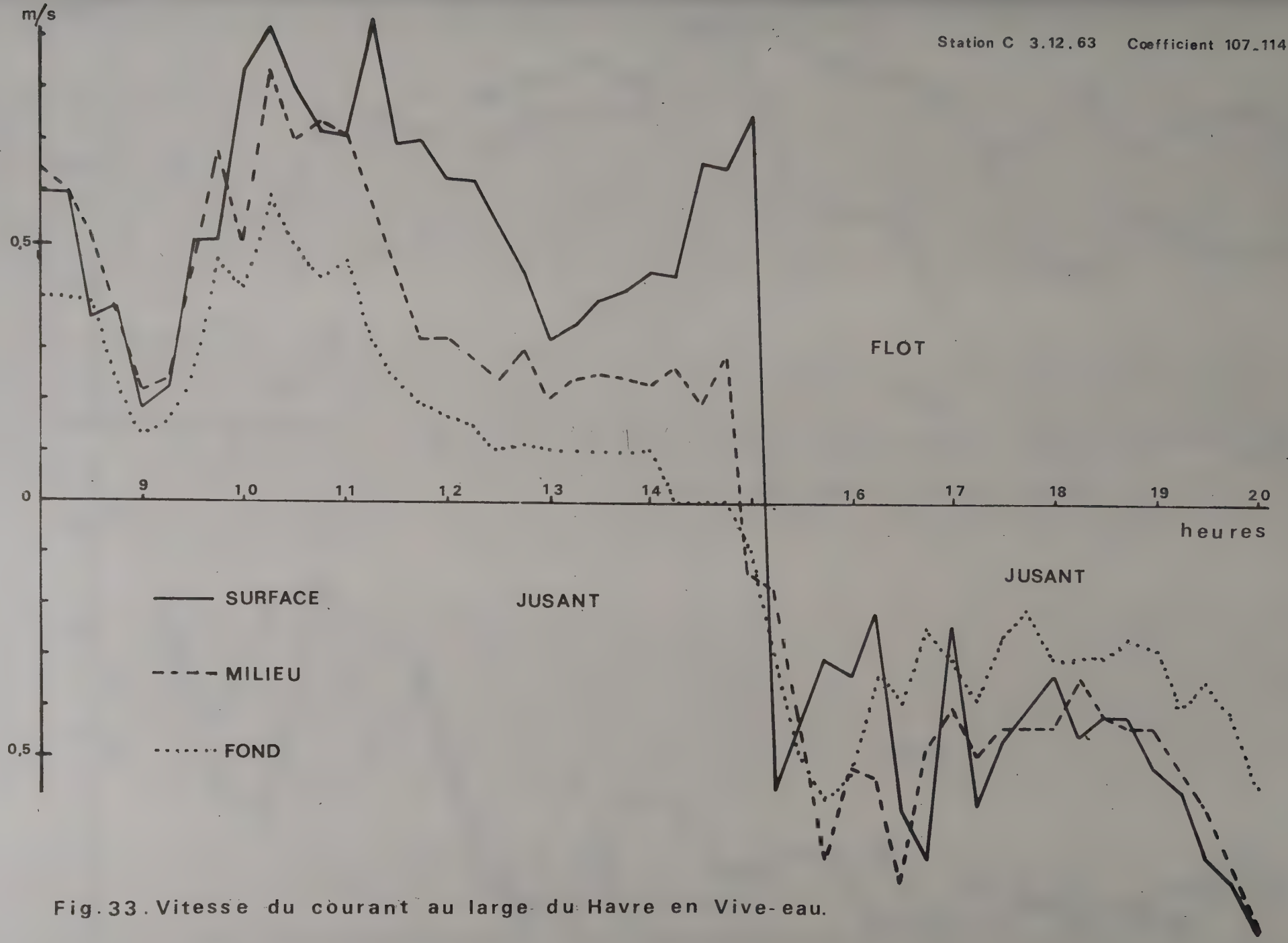


Fig. 33. Vitesse du courant au large du Havre en Vive-eau.

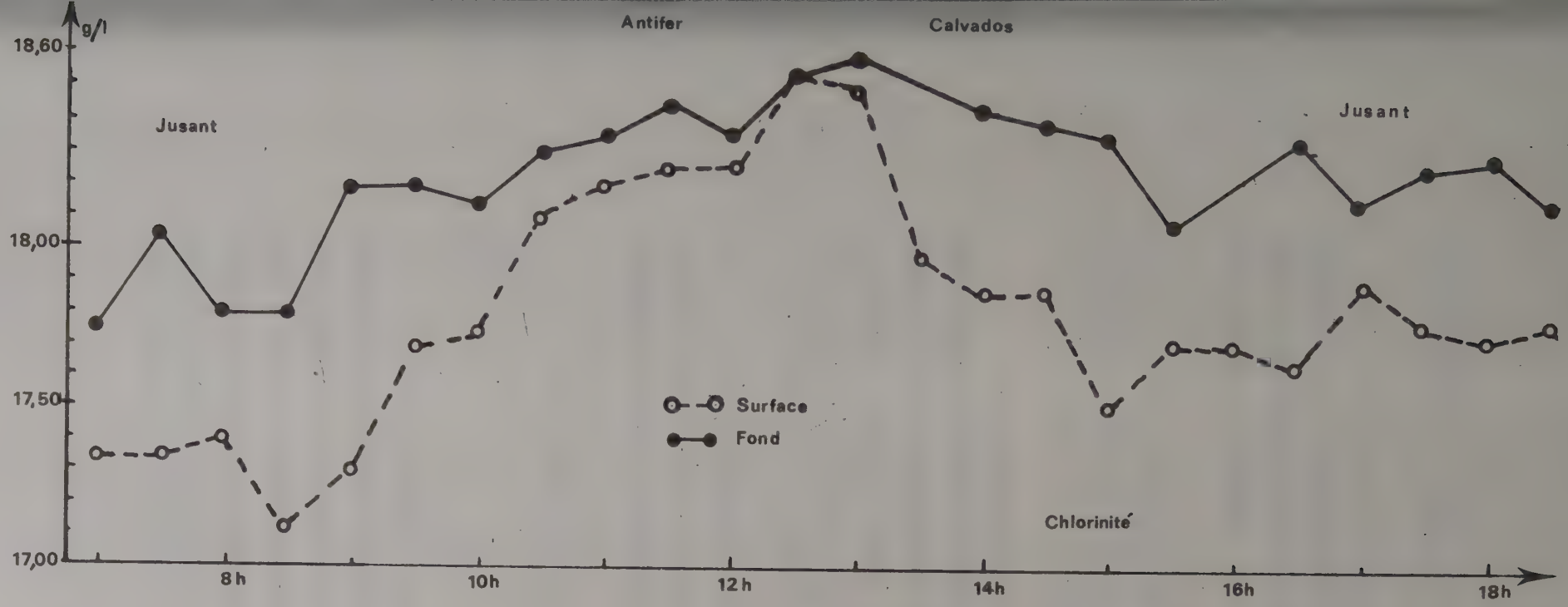
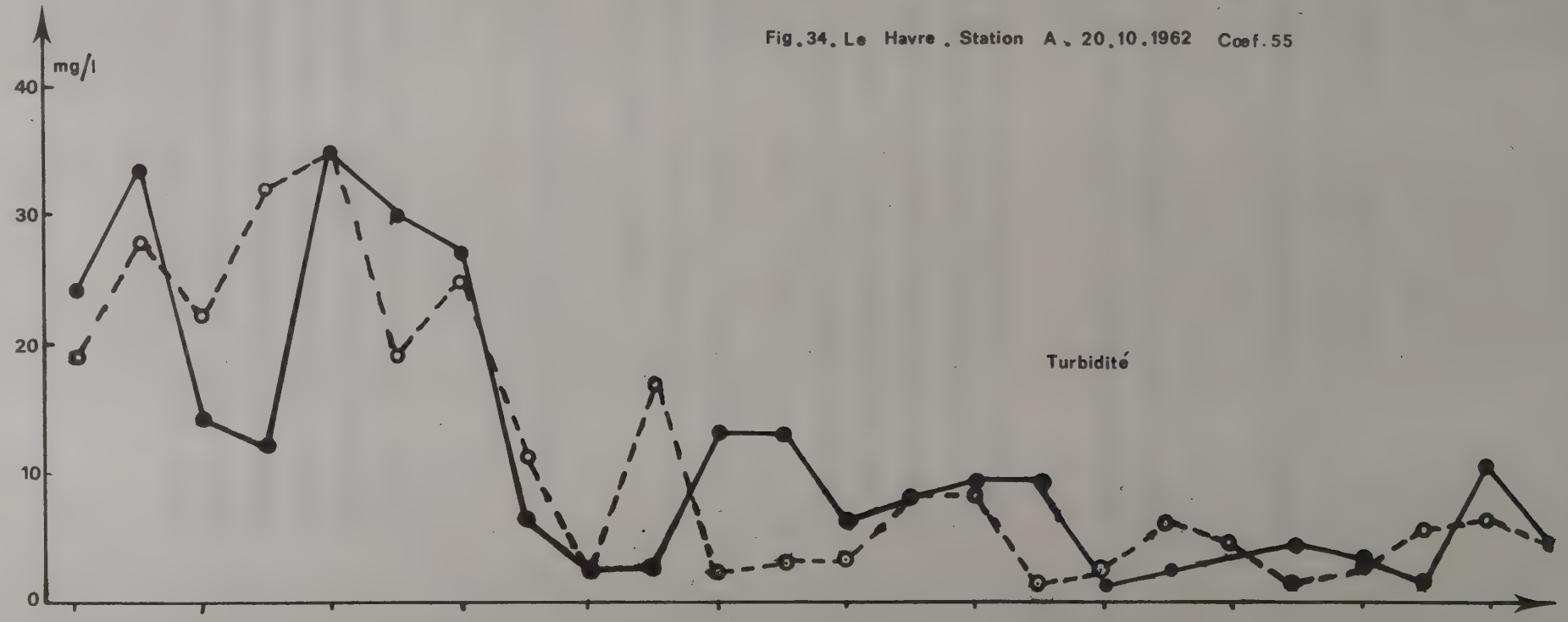


Fig. 34. Le Havre . Station A . 20.10.1962 Coef. 55



du Havre vers le large.

Il s'agit de suspensions presque dépourvues de sablons et très riches en fibres lignifiées. L'évacuation se fait d'abord en direction du Havre jusqu'au moment où apparaît le courant d'Antifer.

Les eaux sont stratifiées pendant le jusant et plus homogènes pendant le flot. La chlorinité est presque toujours comprise entre 16 et 18 mg/l.

En période de vives-eaux les suspensions sont plus grossières et plus abondantes où débouche l'estuaire (station A). La concentration varie assez rapidement de la bordure (60 mg/l.) vers le large (30 mg/l.). Il se produit donc une décantation préférentielle des particules les plus denses ou les plus grossières à proximité du port du Havre.

Ce phénomène peut être attribué à l'agitation qui diminue peu à peu la taille des flocons et réduit ainsi leur vitesse de chute (IPPEN A.T. - 1966 - p. 187).

Les eaux sont plus homogènes que lors des mortes-eaux et la chlorinité est légèrement plus élevée (17 à 18 mg/l.)

On peut donc admettre qu'en période d'étiage l'évacuation des suspensions est assez malaisée surtout lorsque les coefficients de marée sont élevés. Il se produit alors une légère mise en suspension des sablons de l'estuaire qui viennent s'ajouter aux suspensions pelitiques du fleuve et qui se déposent en partie à proximité du Havre avant que le courant d'Antifer ne les rejette vers le Sud ou le Sud-Ouest.

X-4-3 - Débit solide en période moyenne

L'augmentation du débit du fleuve entraîne une augmentation de la stratification des eaux pendant le jusant et une diminution de la turbidité moyenne qui passe de 26 mg/l. à 9 mg/l. Ce phénomène qui semble être paradoxal est dû à l'augmentation de l'importance des eaux marines qui élèvent la chlorinité et à une plus grande difficulté de pénétration de la marée mécanique qui a pour rôle de mettre en suspension les vases des banquettes latérales.

La décantation dans la région havraise est importante. La turbidité passe de 23 mg/l. à la station A à 9 mg/l. à la station C.

Par rapport à une période d'étiage on constate que les concentrations sont 3 fois plus faibles. Le débit de la rivière étant trois fois plus élevé, la quantité de suspensions évacuées en mer est donc à peu près la même.

Si le coefficient de marée est faible (45 à 55) les eaux sont stratifiées pendant tout le cycle de marée et ceci depuis la station A jusqu'à la station C.

Les eaux fluvio-marines (14 mg/l.) s'écoulent donc sans peine au-dessus des eaux marines (18 mg/l.) qui se déplacent d'ailleurs beaucoup plus lentement (GERMANEAU J. - 1969 - p. 40 à 43).

La turbidité est extrêmement faible (10 à 20 mg/l.). Ceci indique bien que l'action de la marée est nécessaire pour évacuer les suspensions dont les fractions les plus grossières ont tendance à se déposer entre Tancarville et Rouen.

Les flocons qui sont évacués lorsque la turbulence

est très faible dans l'estuaire, sont presque exclusivement pelitiques et riches en fibres végétales.

Même en mer cette association est stable et la décantation est lente. A la station A la turbidité moyenne est de 18 mg/l., à la station C elle est encore de 13 mg/l.

X-4-4 - Débit solide de crue

Les mesures que nous possédons correspondent toutes à une période de vives-eaux. Le coefficient de marée est compris entre 96 et 107. Le débit de la Seine est, pour les exemples que nous avons choisis de 600 à 630 m3/s. On constate dans ces conditions que les choses suivantes se produisent :

- les eaux sont très nettement stratifiées dès le début du jusant à la station A. Elles ne le sont plus à la station C. L'homogénéisation des eaux en mer est donc très rapide,

- nous savons que le mascaret se produit lorsque le coefficient est supérieur à 100 et qu'il élève la turbidité. En période de crue l'évacuation de ces suspensions est aisée. A la station A nous avons trouvé une turbidité moyenne de 108 mg/l. et une turbidité maximale de 379 mg/l. Ces suspensions contiennent vraisemblablement une fraction grossière qui se détache très vite de la trame organique, car la décantation dans la région havraise est très rapide. A la station C la turbidité moyenne est trois fois plus réduite qu'à la station A (32 mg/l. contre 108 mg/l.).

En comparant les turbidités et les débits à la station A en période d'étiage et de crue, on constate que :

- l'expulsion des suspensions permanentes se fait le plus aisément en vives-eaux lorsque le débit est supérieur à 500 m3/s.

On peut estimer que pour un coefficient de marée voisin de 100 la Seine rejette en période de crue (700 m3/s.) huit fois plus de suspensions qu'en période d'étiage (150 m3/s.).

Lorsque le débit oscille seulement entre 150 et 450 m3/s. il semble que la quantité de suspensions évacuées en mer par marée soit assez constante.

XI - SEDIMENTATION DANS LA REGION HAVRAISE

La région havraise est certainement la partie de l'estuaire de la Seine qui est la plus difficile à comprendre. Le relief sous-marin est très irrégulier et les éléments détritiques qui se trouvent en surface semblent être assez souvent fossiles. Les différences d'altitude sont telles que l'action des houles varie très vite d'un point à l'autre.

En première approximation, on peut admettre que le nombre des modes de transport est d'autant plus élevé que le point d'observation est plus proche du rivage. Nous nous proposons ici d'évaluer le rôle de la mer et du fleuve dans la sédimentation entre la Grande Rade et le port du Havre.

Nous avons divisé l'étendue qui nous occupe en trois cantons (fig. 35). Chacun d'eux a des caractères sédimentologiques bien précis.

Canton 1 : Chenal d'Accès
Canton 2 : Avant-Port
Canton 3 : Bassin Théophile Ducrocq

XI-1 - Sédimentation dans le chenal d'Accès

Le chenal d'Accès a été creusé à travers une accumula-

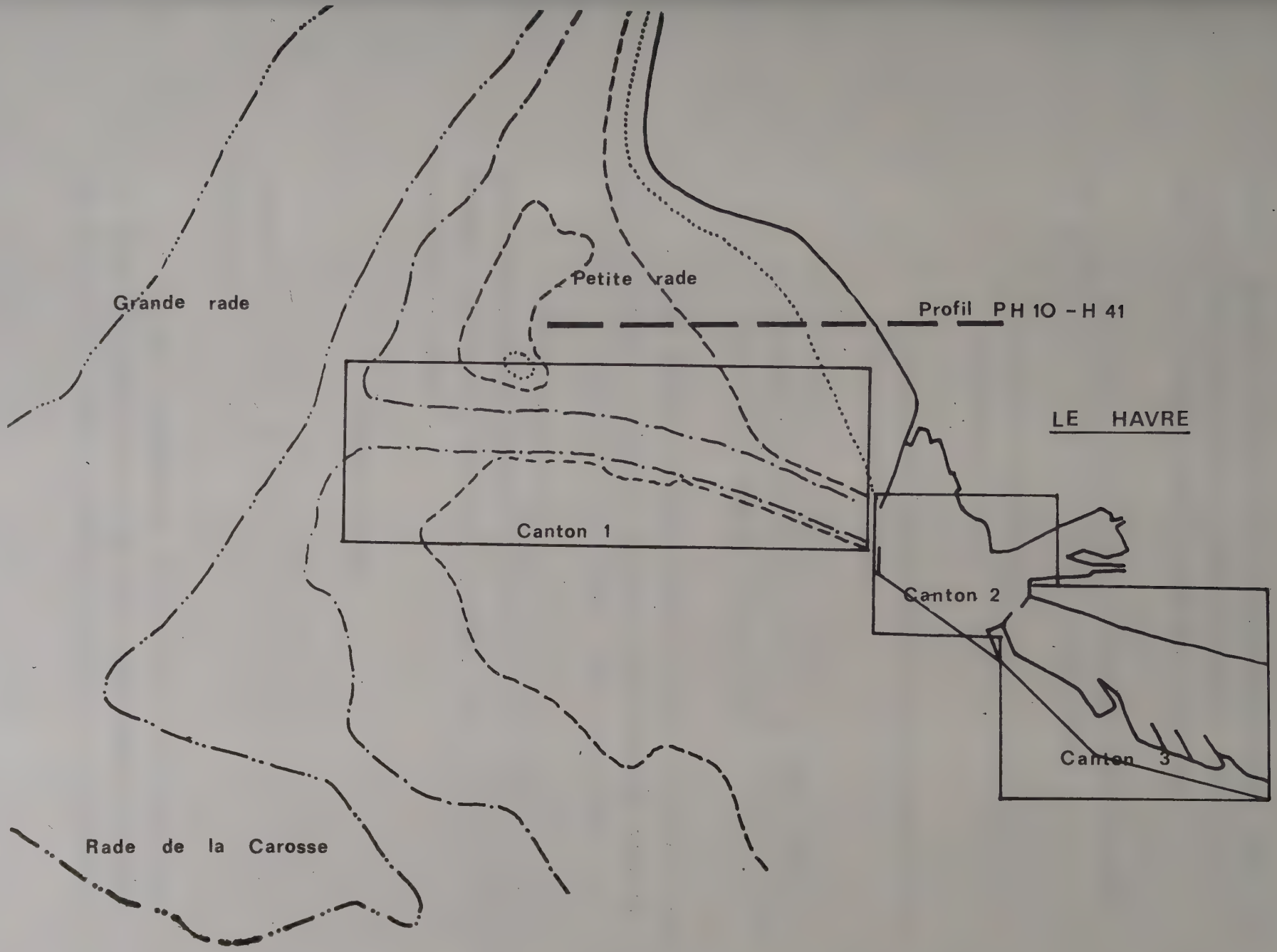


Fig. 35 . Etude de la région havraise

tion de galets et de graviers qui sont actuellement immobiles et qui forment des reliefs : Banc de l'Eclat, Hauts de la Rade, Grand Placard et Hauts de Quarante (fig. 36).

Nous avons déjà vu que la répartition horizontale des sables permet d'identifier trois mouvements :

- une dérive longitudinale récente située au-delà des fonds de -11 m.,

- un déplacement transversal au moins jusqu'à -15 m. dans la Grande Rade,

- une dérive actuelle le long de la plage Sainte-Adresse. Cette dérive accumule des sables le long de la jetée Nord de l'avant-port.

Les échantillons du chenal d'Accès (CH 1 à CH 7) ont été prélevés par le Service des Etudes Techniques du port du Havre le 28 octobre et le 27 novembre 1963 (fig. 37).

L'étude granulométrique fractionnée permet de diviser cette zone en trois parties. L'influence de la dérive de Sainte-Adresse, du fleuve et des houles longues, varie en effet de la côte vers le large.

XI-1-1 - Chenal externe

Le chenal externe semble soustrait à l'influence du fleuve. Le sédiment qui est grossier est bimodal et dépourvu de vase noire.

Le sable élémentaire le plus fin (125-160 microns) peut être rapproché de celui que nous avons observé sur tout le fond de la Grande Rade. Sa granulométrie qui ne varie pas en

fonction de la distance à la côte ne nous autorise pas à le considérer comme un apport actuel venant du continent. Par analogie avec des observations qui ont souvent été faites sur les plages sous-marines, au-delà des lignes de déferlement, nous préférons penser qu'il s'agit d'une suspension temporaire de houle au large, qui se déplace lentement d'Ouest en Est et qui pénètre dans le chenal jusqu'au point CH 2 (fig. 37).

Le sable élémentaire le plus grossier (250-315 microns) est vraisemblablement fossile. Nous pensons qu'il appartient à la dérive récente qui est représentée sur la figure 36.

Cette sédimentation qui n'atteint pas le point CH 3 est donc entièrement marine et tout à fait identique à celle de la Grande Rade (fig. 17).

XI-1-2 - Chenal moyen

Le chenal moyen est caractérisé par l'apparition d'une fraction pelitique noire qui devient rapidement importante (20 à 40 %). Nous nous trouvons vraisemblablement à la limite des apports fluviaux. Nous avons vu précédemment que les suspensions permanentes qui sont rejetées par le fleuve s'appauvrissent en quartz au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'embouchure.

A la limite les flocons ont perdu tous les grains équidimensionnels qu'ils contenaient. Ils conservent seulement les pelites, les micas et leur trame fibreuse. Ceci a été vérifié par l'étude qualitative des suspensions du large. On peut ainsi expliquer que le sédiment du point CH 5 qui contient 40 % de vase noire est cependant dépourvu de ce mode secondaire (50-100 microns) qui est toujours présent dans la Seine et dans son estuaire.

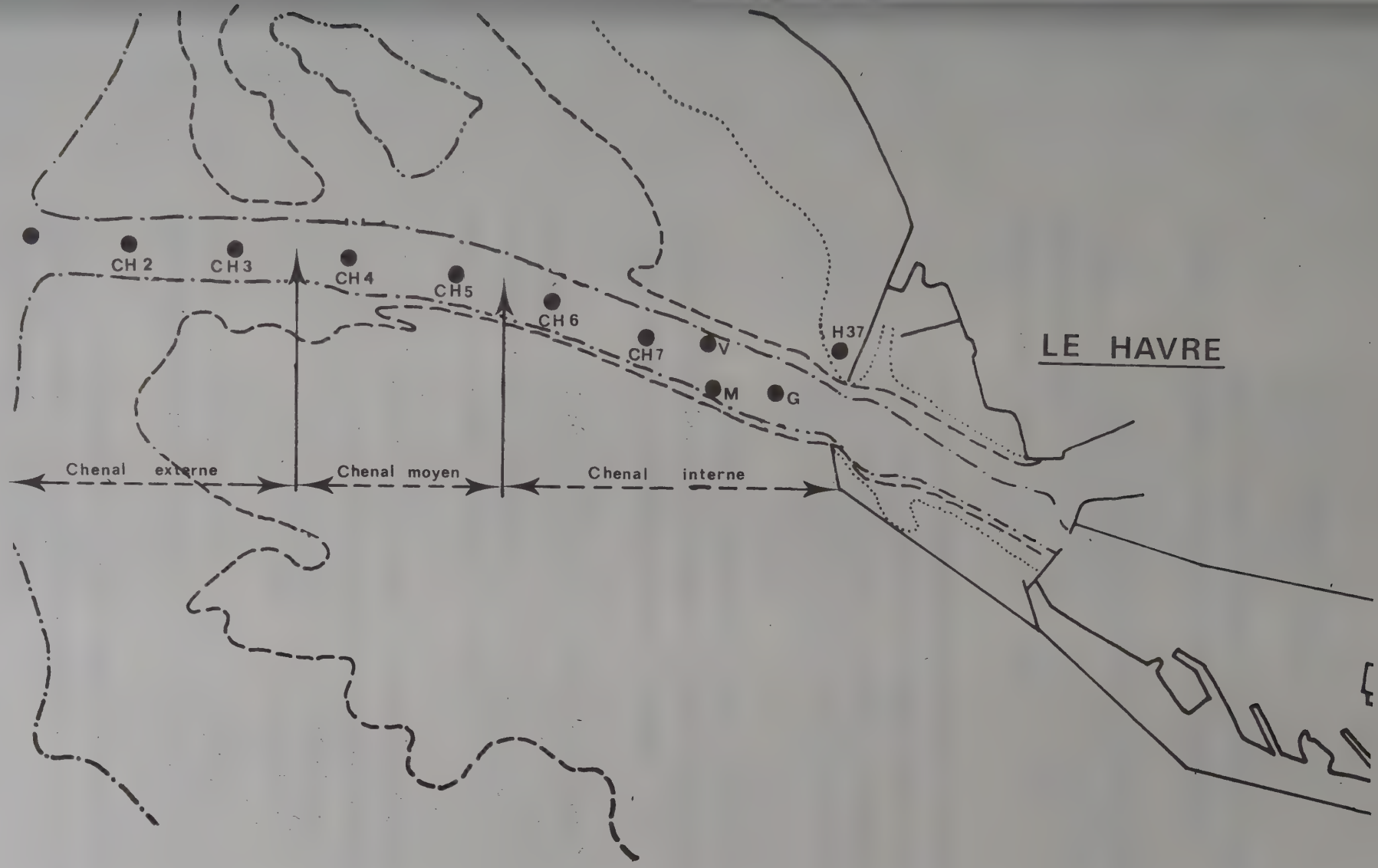


Fig. 37. Localisation des échantillons prélevés dans le chenal d'accès

XI-1-3 - Chenal interne

Dans le chenal interne la sédimentation est complexe. On peut distinguer les trois éléments suivants :

- les sables élémentaires les plus grossiers correspondent à des dérives récentes qui sont aujourd'hui immobilisées entre -10 et -12 m. Cette dérive affleure au fond de la petite Rade (point H. 39 - fig. 38),

- les sables élémentaires moyens (100-200 microns) correspondent à des suspensions temporaires de houle en bordure. Ces suspensions dépourvues de matière organique sont élaborées au niveau des déferlements de la plage Sainte-Adresse (points H. 37 et H. 38 - fig. 38),

- les sables élémentaires les plus fins (50-100 microns) proviennent de l'estuaire, mais ne semblent pas dépasser vers le Nord la limite du chenal d'Accès.

Les sables les plus caractéristiques de cette zone sont donc trimodaux (CH 6). Ils proviennent de l'addition d'une suspension permanente, d'une suspension de houle en bordure et d'un sable de dérive fossile.

Plus près du rivage, les sables fossiles disparaissent sous une couverture actuelle de sables mobiles. Le sable devient alors bimodal (suspensions permanentes et suspensions temporaires). C'est par exemple le cas au point V.

A proximité de l'estran, le sable est actuel et entièrement d'origine marine (H. 37 - fig. 38).

A l'entrée de l'avant-port, les pelites d'origine fluviale forment 92 à 96 % du sédiment brut et le mode 50-100 microns est très prononcé.

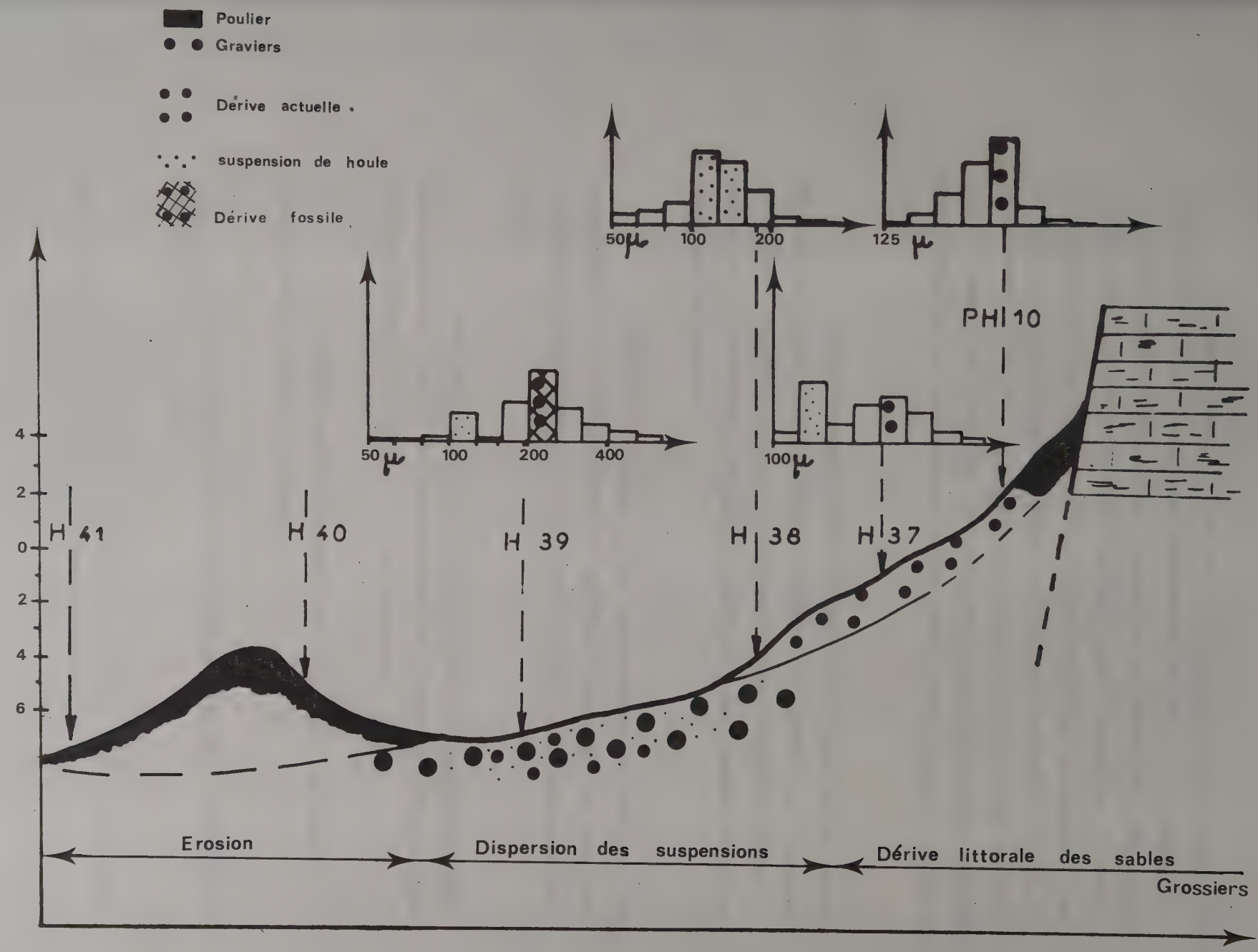


Fig. 38. Interprétation du profil PH 10 . H 41

Nous avons ici une belle occasion de réfléchir sur l'origine et la génèse des sédiments actuels. Il apparaît nettement que l'étude granulométrique globale des sables ne permet pas à elle seule de dessiner leur histoire. Il est nécessaire de réunir tous les renseignements concernant les régions qui enveloppent celle dont on entreprend l'étude. Il faut aussi bien faire intervenir les houles que les courants et ne jamais oublier que les reliefs inaffouillables imposent des transits ou des obstacles qui sont assez faciles à déterminer.

Les caractéristiques granulométriques en un point déterminé n'ont aucune valeur absolue. On peut, par exemple, très bien admettre que le classement total résulte d'une somme de "classements élémentaires" qui sont aussi bons les uns que les autres.

Près des rivages où la topographie se modifie très rapidement, les sables sont en général composés et résultent de dépôts "simultanés" de plusieurs sables élémentaires actuels.

Dans ce cas, on a une polymodalité <u>synégénétique</u> dans laquelle doit être recherchée une image des variations que subissent les houles et les courants.

Un dépôt peut également se faire sur un matériel fossile et à peine le recouvrir.

La polymodalité est dite <u>épigénétique</u> (SHEPARD F.P. et MOORE D.G. - 1954).

Deux histoires différentes peuvent donc théoriquement conduire exactement au même résultat.

XI-2 - Sédimentation dans l'avant-port

Les prélèvements ont été faits à la drague aspiratrice par les Services Techniques du port du Havre, lors d'une campagne d'entretien le 16 et le 24 septembre 1963.

Les sédiments de l'avant-port sont beaucoup plus simples que ceux de la partie interne du chenal d'Accès. Ils sont tous bimodaux et proviennent à la fois de la plage Sainte-Adresse et du fleuve.

Le sable élémentaire le plus fin (63-80 microns) est associé à une fraction pelitique noire qui est très importante (92 à 95 %).

Le sable élémentaire le plus grossier (125-160 microns) provient de la plage Sainte-Adresse. Il s'agit vraisemblablement d'une suspension de houle en bordure, introduite dans l'avant-port lors des vives-eaux et des tempêtes d'Ouest. Cet apport semble peu important (2 % environ du sédiment total).

XI-3 - Sédimentation dans le port

Les prélèvements ont été faits par les Services du port du Havre sur des fonds qui varient entre -11 et -13 m.

La sédimentation semble être ici beaucoup moins importante que dans l'avant-port. On voit apparaître des sables élémentaires grossiers (200-400 microns) qui sont vraisemblablement fossiles. Ils forment sans doute un substrat sur lequel se déposent actuellement des vases noires qui sont très liquides et difficiles à prélever .

Ces sables grossiers contiennent des débris coquilliers de 3 à 10 mm qui ne peuvent pas avoir été transportés en

suspension (Cardium, Abra, Mytilus, Balanus, Mactra).

A l'entrée du bassin le mode 63-80 microns est important. Plus à l'intérieur il est moins développé. Il accompagne parfois un mode 100-125 microns qui provient peut-être de la plage Sainte-Adresse.

XII - SEDIMENTATION DANS LA SEINE ET DANS SON ESTUAIRE - ORIGINE ET DEPLACEMENT DES SABLES ET DES VASES

La Seine peut être divisée en quatre parties (fig. 39) :

- Seine fluviale en amont de Biessard.
- Seine fluvio-marine entre Biessard et Vieux-Port.
- Seine marine entre Vieux-Port et le Havre.
- Baie de Seine au large du méridien du Havre.

XII-1 - Nature et origine des sables de la Seine fluviale

XII-1-1 - En amont du Loing

En amont du confluent du Loing les alluvions proviennent de l'Aube, de l'Armançon, de l'Yonne et de la Petite-Seine.

Le mélange des gravelles calcaires du Jurassique, des roches éruptives du Morvan et des sables tertiaires de la Petite Seine, donne des alluvions très hétérométriques qui s'affinent rapidement vers l'aval.

Le cortège minéralogique est assez simple et contient les minéraux suivants : grenat, staurotide, tourmaline et zircon. Les minéraux provenant du Jurassique sont très rares ; ceux

Répartition longitudinale des sédiments.

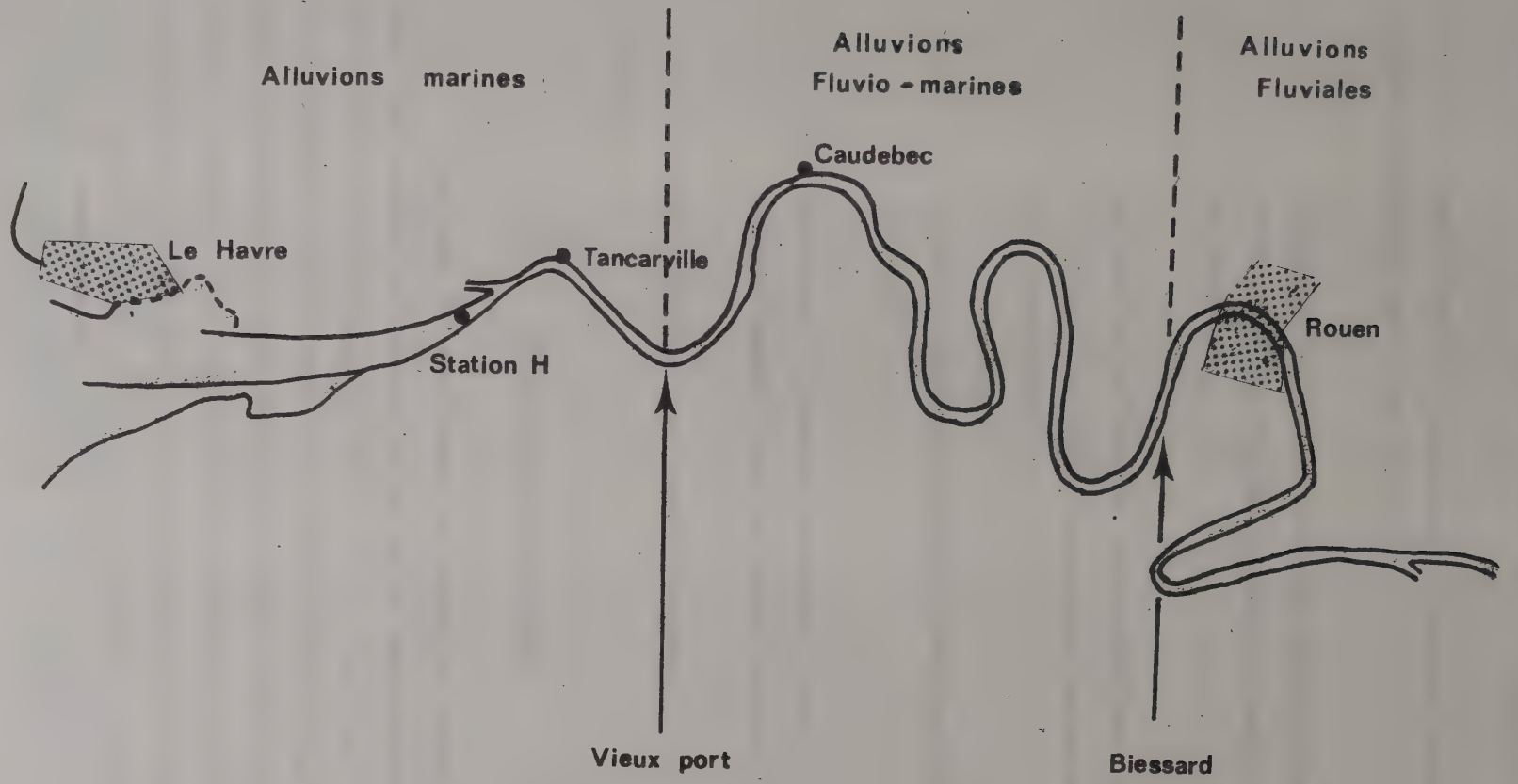


Fig . 39

provenant du Crétacé sont plus nombreux et usés ; ceux provenant du Morvan sont très nombreux et anguleux.

Les éléments légers qu'on trouve jusqu'à Rouen en grande abondance sont les suivants :

- fragments de granites, de granulites et de rhyolites provenant du Morvan par l'Yonne et l'Armançon,

- gravelles calcaires provenant des formations sédimentaires postérieures au Bathonien par l'Aube et l'Armançon,

- silex en général blonds provenant du Crétacé supérieur,

- quelques éléments quartzeux issus du Tertiaire apparaissent dans la Petite Seine.

L'axe du drainage semble emprunter la vallée de l'Yonne.

XII-1-2 - Les apports du Loing

En aval du confluent du Loing on voit apparaître dans les basses terrasses de la Seine des minéraux volcaniques qui viennent des Limagnes de Loire et d'Allier. Les augites denticulées caractérisent ces apports méridionaux, dont une partie provient des ponces du Mont Dore. Tout se passe comme si ces cinérites qui ne sont pas compactes avaient été désagrégées avant les basaltes. Des produits détritiques de même origine ont récemment été mis en évidence dans les argiles sableuses du Bourbonnais (CLOCCHIATI B. et TOURENQ J. - 1971) dont le dépôt est vraisemblablement très complexe (LE RIBAULT L. et

TOURENQ J. - 1971).

Le passage des alluvions du bassin de la Loire à celui de la Seine n'est pas connu. En 1971, nous avons proposé une hypothèse qui conduit à mettre en doute l'attribution stratigraphique de certaines formations du bassin versant du Loing. Le sujet a été repris par POMEROL (1973 - p. 156-157) et les premiers résultats qui ont été obtenus montrent bien que le problème de la séparation de la Seine et de la Loire reste à résoudre selon les premières indications que nous avons données.

Nous pensons qu'un épandage s'est fait au Villafranchien, en nous référant aux études faites depuis déjà longtemps par les géologues de Clermont-Ferrand.

Pendant le Quaternaire ces alluvions, vraisemblablement entreposées entre Gien et Montargis, ont été reprises par le Loing et ses affluents. On les trouve actuellement tout le long de la Seine fluviale, associées à celles de l'Aube, de l'Armançon et de l'Yonne.

XII-1-3 - Sables de la Seine entre le Loing et Paris

Nous avons trouvé dans cet intervalle (Corbeil) des sables complexes contenant tous les éléments que nous avons cités et qui proviennent de l'Aube, de l'Armançon, de l'Yonne et du Loing.

XII-1-4 - Apports de la Marne et de l'Oise

Les sables apportés par ces deux rivières proviennent du remaniement des formations marines du Tertiaire. Les minéraux lourds les plus caractéristiques ont une origine nordique et datent de l'Eocène inférieur.

A cette époque, le bassin de Paris est en communication avec le bassin Belge, et on peut admettre (fig. 42) que pendant les différentes transgressions, des transits longitudinaux et transversaux se sont produits exactement comme on l'observe actuellement dans les baies ou les golfes.

Ce cortège tertiaire -qui contient peut être des minéraux d'origine armoricaine- est formé de minéraux bien conservés, usés et de petite taille (grenat, épidote, hornblende verte).

XII-1-5 - Sables en aval du confluent de l'Oise

Les sables fossiles de la Seine contiennent jusqu'à Rouen une très grande variété de particules lourdes ou légères provenant de tout le bassin versant de la Seine. La nature des assemblages varie beaucoup d'un point à l'autre du chenal actuel de Navigation.

Nous pensons donc que le fleuve actuel -qui est aménagé jusqu'à Poses- a une puissance très limitée par rapport à celle qu'il avait autrefois. Il coule sur d'anciennes alluvions qui sont tantôt d'origine locale, tantôt d'origine lointaine.

L'élaboration de ce "fond alluvial grossier" a probablement été très longue et très lente. Il faut sans doute faire appel à un certain nombre de cycles climatiques. Chaque période de réchauffement peut en effet déplacer les zones d'érosion vers les hauteurs "par suite du développement d'une végétation abondante sur les reliefs peu élevés" (CASTAING P., FERAL A., KLINGEBIEL A. - 1970 - p. 39).

L'alternance des apports latéraux et des apports longitudinaux permet d'interpréter élégamment toutes les observations que nous avons faites entre Paris et Rouen.

XII-1-6 - Apports actuels de la Seine fluviale

Tant qu'elle n'est pas soumise à l'action de la marée mécanique, la Seine ne transporte que des "suspensions permanentes" qui sont très riches en pelites et en fibres végétales. On peut considérer que pour un débit moyen de 400 m3/s., la turbidité est de 40 mg/l.

La phase quartzeuse des suspensions fluviales ne forme que 1 à 5 % de l'ensemble et le grain moyen oscille entre 50 et 80 microns.

Le cortège caractéristique des apports fluviaux est donc formé de minéraux en grains de très petite taille. Les plus abondants sont tabulaires ou de faible densité (micas, hornblende verte, tourmaline ...).

Les minéraux caractéristiques sont les suivants :

- grenat
- épidote verte
- hornblende verte
- anatase
- corindon

XII-1-7 - Influence de la marée mécanique entre Poses et Rouen

En aval de Poses se fait sentir l'influence de la marée mécanique. La répartition des suspensions n'est plus seulement une fonction du débit du fleuve.

La turbidité est maximale lors de la renverse des courants. Les valeurs restent cependant assez faibles (77 mg/l.) par rapport à celles que l'on observe dans l'estuaire.

Dans cet intervalle la marée mécanique n'influe pas sur la nature des suspensions permanentes. La turbidité moyenne est un peu plus élevée que dans le fleuve.

XII-2 - Nature et origine des sables de la Seine fluvio-marine

La Seine fluvio-marine s'étend de Biessard à Vieux-Port.

Dans l'axe du chenal les sables résultent du mélange d'une fraction fossile grossière et d'une fraction fine marine.

Les premières suspensions marines apparaissent à Biessard (fig. 39) leur importance augmente peu à peu vers l'aval, mais jusqu'à Vieux-Port elles ne parviennent pas à dissimuler les alluvions fluviales fossiles qui affleurent au moins dans l'axe du chenal de Navigation.

Dans la partie du fleuve qui est comprise entre Biessard et Vieux-Port, l'influence mécanique de la marée est considérable. La turbidité devient très importante lorsque le coefficient est supérieur à 100. Le mascaret remet en suspension les sables les plus fins et les déplace vers l'amont sous forme de suspensions sableuses semi-permanentes qui se déplacent toujours vers l'amont et qui ont un cortège riche en minéraux d'origine marine.

Les suspensions pelitiques d'origine fluviale ont au contraire une résultante de transport qui est dirigée vers l'aval.

Les eaux sont toujours homogènes et la chlorinité varie de 1 à 5 g/l. pendant les vives-eaux exceptionnelles (Vieux-Port).

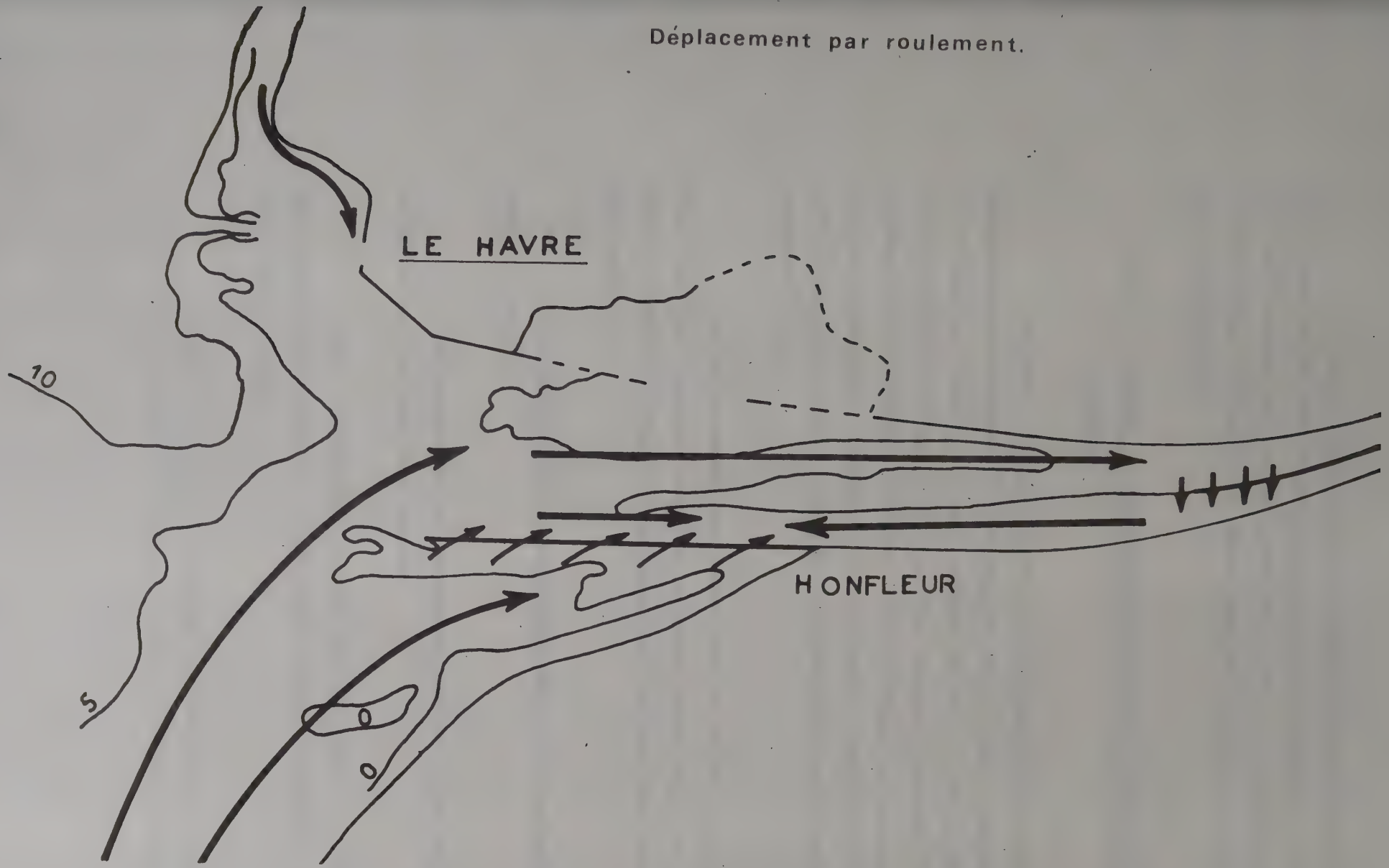


Fig.40. — Déplacement des particules superieures à 160 microns.

La marée saline atteint assez difficilement Caudebec. Pour que la chlorinité maximale soit de 400 mg/l. il faut que le coefficient soit très élevé (109-113) et le débit du fleuve très faible, (125 m3/s.). Même dans ce cas là les eaux ne sont pas stratifiées.

XII-3 - Nature et origine des sables de l'estuaire de la Seine

En aval de Vieux-Port, les sables du Calvados et les suspensions du Mascaret dissimulent tout à fait les anciennes alluvions du fleuve. On peut estimer à 20 m. l'épaisseur des dépôts marins au niveau du Havre. Par dérive littorale ils proviennent de l'Ouest et du Nord. Leur cortège est caractérisé par la hornblende, l'épidote et le grenat. Ces sables déplacés par les houles entre -5 et -10 m. pénètrent dans l'estuaire pendant le flot.

Le déplacement des fractions 125 à 200 microns se fait dans les chenaux selon un circuit fermé (fig. 40) qui rappelle celui des estuaires sauvages qui ont été décrits en Hollande.

Ces sables sont prisonniers dès qu'ils pénètrent dans l'estuaire.

L'alimentation de l'estuaire se fait par dérive littorale sous l'action des houles.

Avant la construction du port du Havre il y avait sans doute deux dérives. Il n'existe plus aujourd'hui que celle du Calvados.

Les sables 100-125 microns peuvent être évacués à la fin du jusant lorsque la hauteur d'eau est la plus faible

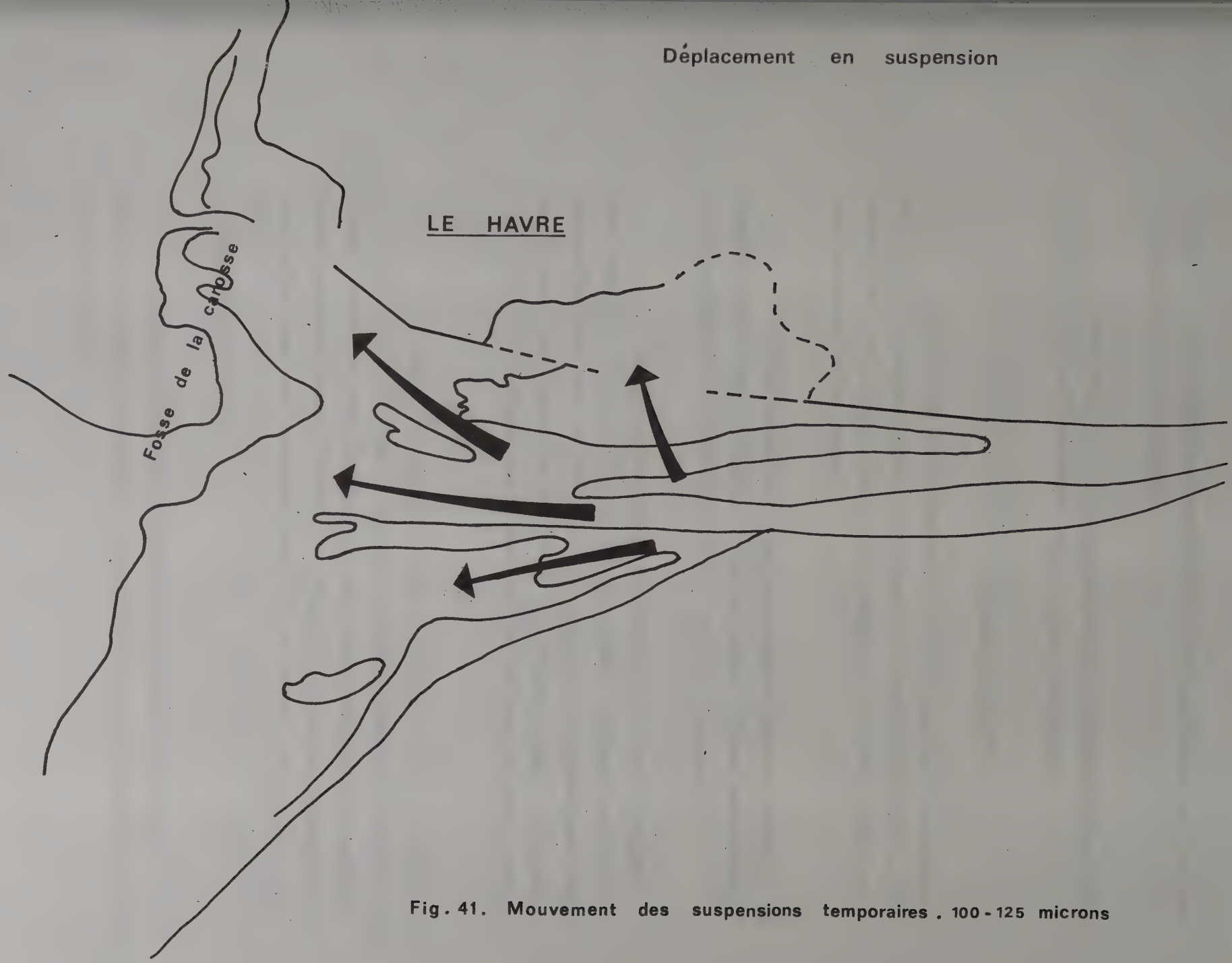


Fig. 41. Mouvement des suspensions temporaires . 100 - 125 microns

(fig. 41). Ils subissent une décantation immédiate et n'atteignent pas le port du Havre.

Les suspensions permanentes sont évacuées plus aisément (fig. 43) et pénètrent dans le port du Havre.

XII-4 - Nature et origine des sables en mer

Le régime hydrologique à l'extérieur de l'estuaire est surtout commandé par les courants de marée qui sont pivotants. Le flot apparaît au Nord (courant d'Antifer) puis au Sud (courant du Calvados).

Ce mécanisme fait que les suspensions se déposent en premier lieu dans la région havraise avant d'être repoussées vers les côtes du Calvados ou bien vers l'estuaire.

La turbidité au large dépend de la mise en suspension dans l'estuaire et du débit du fleuve. Lorsqu'une crue se produit en période de vive-eau la turbidité moyenne peut être de 100 mg/l. à proximité du Havre. Ces suspensions se déposent dans la partie interne du chenal de Navigation et dans l'avant-port.

Au large et au-dessus des fonds de -15 m. la turbidité n'est plus que de 30 mg/l. Entre la Grande Rade et l'estuaire se produit donc une décantation qui est assez rapide. Les sables 50-100 microns, sous l'effet de l'agitation, se détachent de la trame organique qui les soutient. Il ne reste plus ensuite que des pelites, des micas et des fibres lignifiées qui sont difficilement décomposables.

Pendant les mortes-eaux et en période d'étiage, les eaux sont presque constamment stratifiées et les turbidités sont faibles (20 mg/l.).

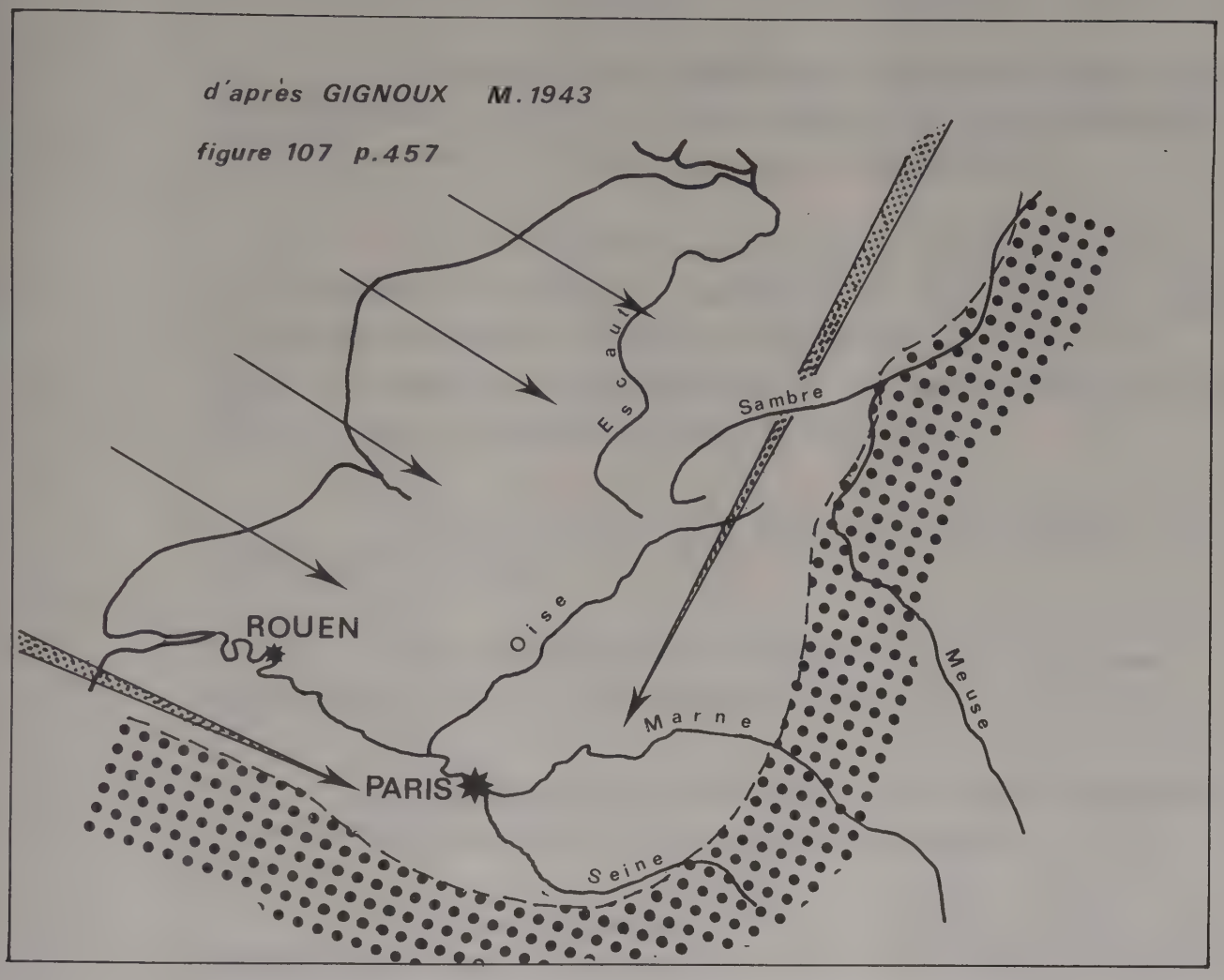


Fig. 42.— Représentation schématique du déplacement et de l'homogénéisation des minéraux lourds pendant l'Eocène.

Pendant les vives-eaux et les périodes d'étiage, les eaux sont homogènes et les turbidités augmentent (40 mg/l.).

L'évacuation des suspensions entreposées dans la zone fluvio-marine et dans l'estuaire semble être très importante lorsque le débit du fleuve atteint 600 ou 800 m3/s.

La sédimentation dans la région havraise ne vient pas seulement de l'estuaire. La dérive de Sainte-Adresse apporte quelques sables et quelques suspensions qui viennent du Nord. Cet apport ne forme pas plus de 2 % des sédiments qui pénètrent dans l'avant-port du Havre (fig. 43).

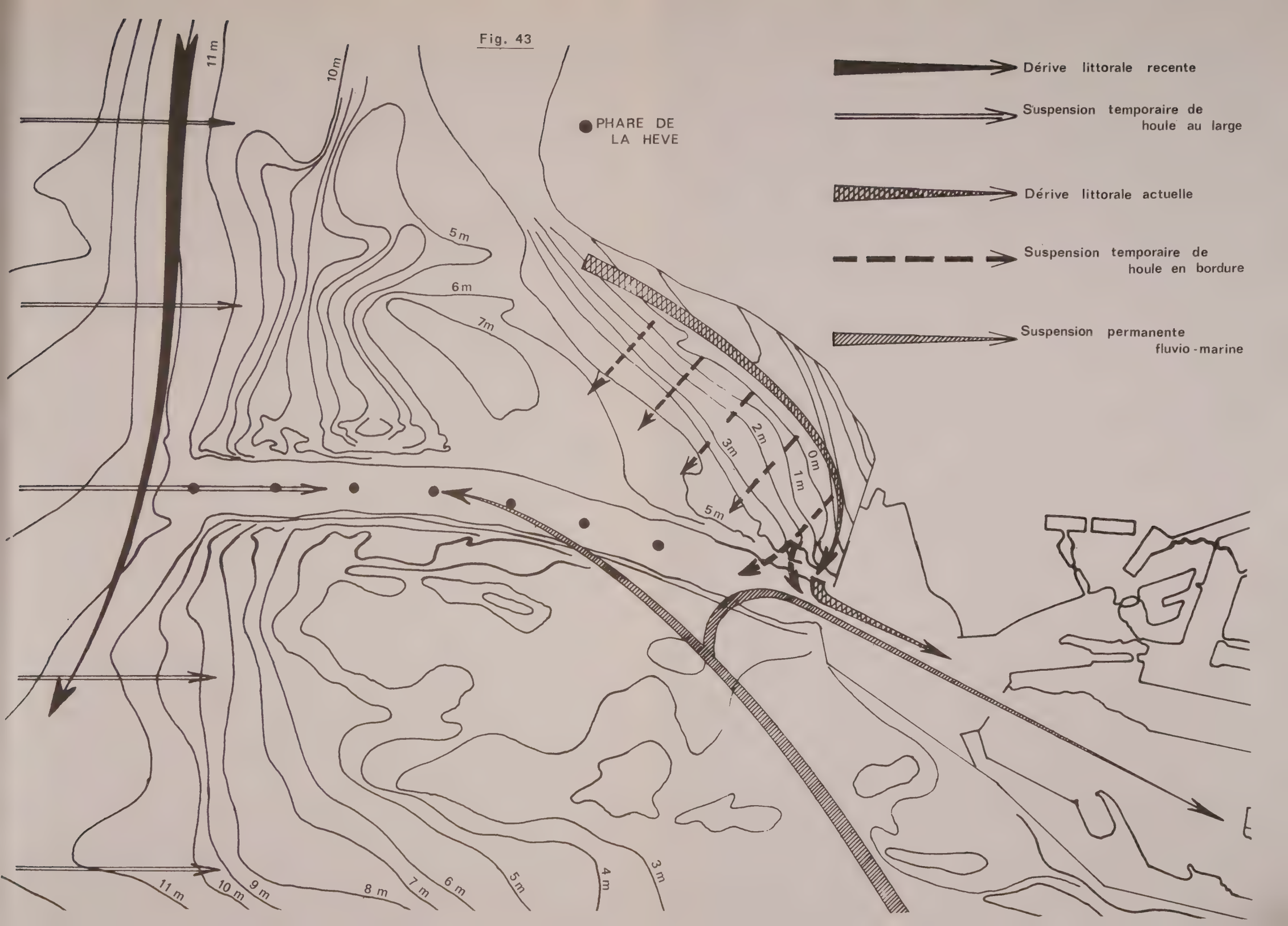
L'estuaire de la Seine peut donc être défini d'une manière très concise :

- les sables marins se déplacent vers l'Est sous l'effet des houles et des courants de flot,

- les suspensions fluviales très fines se déplacent vers l'aval sous l'effet des courants de jusant,

- en mer les vases, qui sont en grande partie d'origine continentale, se déposent sur un substrat fossile dont la morphologie a été élaborée il y peut être 5000 ans.

Fig. 43


Dérive littorale recente
Suspension temporaire de houle au large
Dérive littorale actuelle
Suspension temporaire de houle en bordure
Suspension permanente fluvio-marine
PHARE DE LA HEVE
11 m
10m
5m
6m
7m
2m
3m
0m
1m
5m
11 m
10 m
9 m
8 m
7 m
6 m
5m
4 m
3 m

BIBLIOGRAPHIE

ALLARD P. - Influence de la configuration des bassins sur le régime des marées littorales. Annales de l'Institut Océanographique. 1953. T. XXVIII, fasc. 2, p. 63-112.

ALLEN J.R.L. - Late quaternary Niger delta and adjacent areas : sedimentary environments and lithofacies. Bull. Am. Ass. Petr. Geol. 1965. Vol. 49, n° 5, p. 547-600.

ALLEN G.P. - Hydrodynamic and sedimentological processes in the Gironde estuary. In : Environments and sedimentary processes of the North Aquitaine Coast. International Symposium on interrelationships of estuarine and continental shelf sedimentation. Guide Book. I.G.B.A. 1973. P. 1-89.

BILLY C. - Etude minéralogique des sables côtiers de la Manche, de l'estuaire de la Dives à l'estuaire de la Somme. Revue Géogr. Phys. Geol. Dynam. 1964. Vol. VI, Fasc. 2, p. 123-154.

BLANC M. - Sur l'origine et le dépôt des sables de Sologne et de Lozère. D.E.S. 1944. Paris.

BONNEFILLE R. - Contribution théorique et expérimentale à l'étude du régime des marées. Thèse Grenoble. 1968.

BONNEFILLE R., GERMAIN P. et HEUZEL M. - Estuaire de la Seine. Expérience test de traceurs radio-actifs. Centre de Recherches et d'Essais de Chatou. Rapport ronéotypé. 1965.

BONNEFILLE R., JEANNEL M. et HEUZEL M. - Estuaire de la Seine. Expérience de traceurs radio-actifs. Centre de Recherches et d'Etudes de Chatou. Rapport ronéotypé. 1966.

BOURCART J. - Rapport annuel de la section de sédimentation de la Commission Scientifique de la Seine et de son Bassin. 1943. Paris. Ex. dactyl. p. 1-23.

BRAJNIKOV B. - Le problème des origines des alluvions dans l'estuaire de la Seine. Bull. Institut Océanographique Monaco. 1947. N° 916, p. 1-28.

BURNS R.E. - Importance of marine influence in estuarine sedimentation. Proceedings of the Federal International Agency. 1963. Washington. Pub. n° 970, p. 593-598.

CAILLEUX A. - Ecoulements liquides en nappe et aplanissements. Revue de géomorphologie Dynamique. 1950. T. 1. N° 6, p. 243-271.

CASTAING P. - Contribution à l'étude sédimentologique des terrasses fluviatiles du Bordelais. Relations avec le sable des Landes. Thèse 3è Cycle. Bordeaux. 1972, P. 1-127.

CASTAING P., FERAL A. et KLINGEBIEL A. - Sur la nature et l'origine des minéraux lourds des alluvions quaternaires de la Garonne et de la Dordogne. C.R. Sommaire S.G.F. Fasc. 2. 2 février 1970. P. 38-39.

CHAPON J.P. - L'ouverture du nouveau chenal d'accès au port de Rouen dans l'estuaire de la Seine. Travaux Sciences et Industrie. Paris. Octobre 1963. P. 1-16.

CHAPON J.P. - L'ouverture du nouveau chenal d'accès au port de Rouen dans l'estuaire de la Seine. La Houille Blanche. 1964. N° 4, p. 509-520.

CLOCCHIATI R. et TOURENQ J. - Présence de quartz des ponces du Mont Dore, d'âge pliocène, dans les argiles sableuses du Bourbonnais. C.R. Acad. Sci. Paris. T. 273. 1971. P. 2453-2455.

DUPLAIX S. et POMEROL Ch. - Sur les associations de minéraux lourds des sables granitiques miocènes de l'Ouest du Bassin de Paris. Comptes-Rendus Sommaires Soc. Géol. France. 1948. P. 37-39.

DJOUNKOUSKI N.N. et BOJITCH P.K. - La houle et son action sur les côtes et les ouvrages côtiers. Eyrolles et Gauthier Villars. Paris. 1959. P. 1-404.

FERAL A. - Interprétation sédimentologique et paléogéographique des formations alluviales flandriennes de l'estuaire de la Gironde et de ses dépendances marines. Thèse 3è Cycle. Géologie marine. 1970. Bordeaux. P. 1-158.

FERAL A. et KLINGEBIEL A. - Signification paléoclimatique de deux niveaux de graviers rencontrés dans les dépôts flandriens de l'estuaire de la Gironde entre Blaye et Pauillac. Bull. I.G.B.A. N° 9. 1970. P. 143-151.

FISHER R.V. - Features of coarse grained high concentration fluids and their deposits. Journal Sedimentary Petrology. 1971. Vol. 41, n° 4, p. 916-927.

GERMANEAU J. - Contribution à l'étude dynamique des sables littoraux. Travaux du C.R.E.O. 1967. T. VII, fasc. 2, p. 5-17.

GERMANEAU J. - Origine, déplacement et dépôt des sables. Travaux du C.R.E.O. 1968. Vol. VIII, fasc. 1-2, p. 1-63.

GERMANEAU J. - Origine, déplacement et dépôt des suspensions. Travaux du C.R.E.O. 1969. Vol. IX, fasc. 1-4, p. 1-100.

GERMANEAU J. - Sédiments actuels et sédiments fossiles dans la Seine maritime et dans la Seine fluviale. Travaux du C.R.E.O. 1971. Vol. XI, fasc. 1-4, p. 55-110.

GERMANEAU J. - Remarques sur la présence d'augites du Massif Central entre Seine et Loire. C.R. Sommaires Soc. Géol. France. 1971. Fasc. 8, p. 269-270.

GERMANEAU J. - Origine des cortèges minéralogiques. Travaux du C.R.E.O. 1971. Vol. XI, fasc. 1-4, p. 1-54.

GERARD A. et WEBER C. - L'anomalie magnétique du Bassin Parisien interprétée comme élément structural majeur dans l'histoire géologique de la France. C.R. Acad. Sciences. Paris. 1971. T. 272, p. 921-923.

GIRESSE P. et LARSONNEUR C. - La succession des apports sableux en Manche Centrale, grâce à l'étude des minéraux lourds. Revue Géographie Phys. Géologie Dynam. 1970. Vol. XII, fasc. 1, p. 41-62.

GOUGENHEIM A. - Les marées à la côte. Conférences du C.R.E.O. n° 7. 1950. Paris.

GOULEAU D. - Le régime hydrodynamique de la baie de Bourgneuf et ses conséquences sur la sédimentation. Cahiers Océanographiques XXIII. 1971. N° 7, p. 629-647.

GRAS J. - Le Bassin de Paris méridional. Etude morphologique. Thèse Lettres. 1964. Paris.

GROVEL A.P. - Etude d'un estuaire dans son environnement. Le Blavet maritime et la région de Lorient. Travaux du Laboratoire de Géologie Marine. Faculté des Sciences. Nantes. 1970. P. 1-249.

GUYADER J. et LAPIERRE F. - Le passage Jurassique. Crétacé au large du Cap d'Antifer. Bull. B.R.G.M. 1972. N° 79, p. 185-191.

HANSEN K. - The sediments and the transport of debris in the Graadyb Tidal Area. Geografisk Tidsskrift. 1954. Bd 52, p. 69-82.

IPPEN A.T. - Sedimentation in estuaries. In : Estuary and coastline hydrodynamics. Mc Graw-Hill Book Company, 1966. P. 648-672.

LACOMBE H. - Note sur la marée de la Manche Centrale. Bull. Inform. C.O.E.C. 1949. N° 1, p. 10-12.

LE FLOCH J.F. - Propagation de la marée dans l'estuaire de la Seine et en Seine Maritime. Thèse. Centre de Recherches et d'Etudes Océanographiques. 1961. Paris.

LE FLOCH J.F. - Cours d'Océanographie Physique. Université de Rennes.

LEOPOLD L.B., WOLMAN M.G. et MILLER J.P. - Fluvial processes in geomorphology. Freeman and Co. 1964. San Francisco. P. 1-522.

LE RIBAULT L. et TOURENQ J. - Mise en évidence de trois types d'apports détritiques dans les sables et argiles du Bourbonnais d'après l'examen de la surface des grains de quartz au microscope électronique à balayage. C.R. Acad. Sciences. Paris. T. 274. 1972. P. 528-531.

LUDERS K., HENSEN W., KLEIN H.A., KRAMER J., MAGENC C., SCHULTZ H. et STROHL G. - XXè Congrès International de Navigation. Sect. II. Sujet 5. 1961. P. 5-39.

MICHEL J.P. - Grès à ciment calcaire et conglomérats quaternaires des alluvions anciennes de la Marne et de la Seine en amont de Paris. Bull. Soc. Géol. France. (7) IX. 1967. P. 63-67.

MICHEL J.P. - Présence d'interstades dans les alluvions quaternaires de la Seine en aval de Paris. Bull. Association Fr. Etudes quaternaires. 1969. N° 2, p. 163-171.

MICHEL J.P - Le Quaternaire de la région parisienne. Thèse° Paris VI. 1972. P. 1-479.

NOUGIER J. - Contribution à l'étude sédimentologique des alluvions quaternaires du Bassin de la Seine. Thèse 3è Cycle. 1960. Paris. Ex. ronéotypé.

PELLETIER H. - Etude morphologique de l'augite denticulée dans les projections volcaniques du massif du Mont Dore. Bulletin Historique et Scientifique de l'Auvergne. 1969. N° 622, p. 182-186.

POMEROL Ch. - Origine et mode de dépôt des "sables granitiques" miocènes entre Paris et la Manche. Bulletin Soc. Géol. France. 1951. Sér. 6. T. 1, p. 251-263.

POMEROL Ch. - Répartition des minéraux lourds au Crétacé et à l'Eocène dans le Bassin de Paris, la Belgique et le Sud de l'Angleterre. Conséquences paléogéographiques. 1960. International Geological Congress. New Dehli. 22è Session. Pt III, p. 144-157.

POMEROL Ch. - Esquisse paléogéographique du Bassin de Paris à l'ère Tertiaire et aux temps Quaternaires. Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn. 1967. (2). Vol. IX, fasc. 1, p. 55-86.

POMEROL Ch. - Stratigraphie et paléogéographie. Eres Cenozoïque, Tertiaire et Quaternaire . 1973. Ed. Douin. P. 1-263.

PRICE W.A. et HENDRICK M.P. - Field and model investigation into the reasons for siltation in the Mersey estuary. Proc. Inst. Civil Engrs. 1963. N° 24, p. 433-518.

PRIMEL L. - Recherches sur l'évolution des propriétés des matériaux alluvionnaires dans un bassin et mise en évidence de quelques caractéristiques générales. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Rapport de Recherche n° 1. 1969. P. 1-83.

PUGH D.C. - Etude minéralogique des plages picardes et flamandes. Bulletin Information C.O.E.C. 1963. Vol. V, n° 6.

ROMANOVSKY V. - Rapport sur les recherches effectuées dans l'estuaire de la Seine. Rapport C.R.E.O. 1956. Ex. ronéotypé.

ROUMILHAC M. - Etude des grains de sable de l'Yonne et de la Seine en amont et en aval de leur confluent. D.E.S. Sciences Naturelles. 1960. Paris. Exemplaire dactylographié.

RUDEL A. - Histoire géologique de la Limagne de Clermont-Ferrand. Bulletin Historique et Scientifique de l'Auvergne. 1954. T. LXXIV, p. 110-132.

RUDEL A. - Les minéraux lourds des terrasses quaternaires de Limagne d'Auvergne et les éruptions montdoriennes. Bull. Société Géol. France. 1963. Sér. 7. T. V. P. 468-469.

SHEPARD F.P. et MOORE D.G. - Sedimentary environments differentiated by coarse fraction studies. Am. Ass. Petrol. Geol. 1954. Vol. XLIII, n° 9, p. 2051-2067.

STEPHAN M. - Etude des galets quaternaires de la Seine et de l'Yonne au voisinage de leur confluent. Association des Naturalistes de la vallée du Loing et du Massif de Fontainebleau. 1960. T. XXXVI, n° 7-8, p. 59-62 et n° 9-10, p. 75-78.

TOURENQ J., DECAILLOT P. et POMEROL Ch. - Origine armoricaine des minéraux lourds de la mer des Faluns. Mise en doute de la capture de la pré-Loire à l'Helvétien inférieur. C.R. Sommaires Soc. Géol. France. 1971. Fasc. ?, p. 65-67.

TRICART J. - Formations quaternaires et évolution morphologique de la moyenne vallée de l'Yonne et de la basse vallée de la Cure. Bull. Soc. Géol. France. 1951. Sér. 6. T. 1, fasc. 7, p. 497-510.

TRICART J. et CAILLEUX A. - Cours de géomorphologie. Le modelé périglaciaire. Centre de Documentation Universitaire. Paris. P. 1-350.

VAN VEEN - Ebb and flood channel system in the Netherlands Tidal Waters. Wadden Symposium Groningen. 1950. P. 43-65.

VATAN A. - Etude minéralogique comparée des sédiments arénacés du Bassin de Paris. Comptes Rendus Acad. Sciences. Paris. 1937. T. 205, p. 70-72.

VERGER F. - Marais et wadden du littoral français. Biscaye Frères. Bordeaux. 1968.